

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Avaliação do potencial eólico em regime de  
microgeração**

Rita Isabel Pimentel Moreira

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Doutora Maria Teresa Ponce de Leão

Junho 2010

© Rita Isabel Pimentel Moreira, 2010

# Resumo

A actual crise energética e as implicações sócio-ambientais que dela advêm incitam a utilização de energias renováveis. Estas surgem como resposta às necessidades da sociedade em termos de qualidade, segurança e redução dos danos ambientais. A energia eólica é uma das energias endógenas, gratuita e capaz de responder à procura.

Surge ainda um novo paradigma no sector energético, que assenta na produção à pequena escala, de forma distribuída. Esta geração de energia, na qual o consumidor passa a ter também o papel de produtor, é denominada microgeração, e envolve várias vantagens. Para além de recorrer a energias limpas, a produção é efectuada junto do local de consumo, evitando perdas de energia durante o transporte e aumentando a fiabilidade de fornecimento da electricidade.

A avaliação de locais com características para microprodução eólica é bastante complexa uma vez que o recurso eólico é difícil de prever em zonas edificadas. Para a referida análise é necessário recorrer a ferramentas de avaliação.

Neste trabalho são abordados os factores que influenciam o aproveitamento do recurso eólico bem como as formas existentes de estimar este mesmo recurso. É ilustrado um caso de estudo, que pretende avaliar a influência dos parâmetros que influenciam o perfil do vento, de forma a aferir a viabilidade de implementação de uma pequena turbina eólica num determinado local. É também efectuada uma análise económica de forma a verificar a viabilidade financeira da instalação de uma pequena eólica em determinadas condições do caso de estudo e de acordo com a lei vigente em Portugal relativamente à microgeração.

É possível concluir, com o desenrolar deste trabalho, que a escolha do local de implementação de pequenas turbinas eólicas tem de ser minuciosa. O investimento neste tipo de tecnologia só é rentável para um determinado perfil de vento. Uma vez que a presença de edificado reduz notavelmente o desempenho eólico, é necessário que a velocidade do vento registada seja suficiente, de tal forma que a energia gerada consiga viabilizar o elevado investimento inicial.



# Abstract

*The current energy crisis and the social and environmental problems it brings will encourage the use of renewable energy. This way of energy will answer the needs of society in terms of quality, safety and reducing environmental damage. Wind energy an endogenous energy, free and able to answer demand.*

*A new paradigm in the energy sector is coming, which relies on small scale distributed production. This power generation, in which the consumer shall also have the role of producer, is called microgeneration, and involves a number of advantages. Besides the use of clean energy, the production takes place near the place of consumption, which is more reliable and avoids energy losses.*

*The evaluation of places with characteristics for small wind is quite complex because the wind resource is difficult to predict in built up areas. For this analysis it is necessary to use assessment tools.*

*This investigation examines the parameters which influence the wind resource and the existing ways to estimate this same feature. A case study is illustrated, which aims to estimate the resource of a small wind turbine in a certain location. It is also established an economic analysis in order to verify the financial viability of installing a small wind turbine in certain circumstances of the case study according to the microgeneration portuguese law.*

*The conclusions of this work are based on the rigorous choice for small wind turbines location. Investment in this type of technology is only profitable with a specific wind profile. Once the presence of buildings reduces significantly the wind performance, it is necessary that the wind speed recorded at that location is enough, so that the generated energy can pay the high initial investment.*



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me apoiaram e tornaram possível a realização desta dissertação.

À Professora Doutora Teresa Ponce de Leão, por todo o seu apoio, disponibilidade, simpatia e partilha de conhecimentos.

À Dra. Teresa Simões, investigadora do LNEG, pela dedicação, amabilidade e preciosas sugestões.

Ao LNEG, pela disponibilização de meios fundamentais ao trabalho.

A todos os meus colegas e amigos da faculdade, por todos os conselhos e companheirismo ao longo desta caminhada conjunta.

Aos meus amigos de longa data, que sempre me acompanharam, pela motivação e pelos memoráveis momentos passados durante este período.

Ao Samuel, pela compreensão e por sempre me fazer rir, mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã, pela coragem, apoio incondicional e por serem a minha referência.





*All our science, measured against reality, is primitive and childlike  
and yet it is the most precious thing we have.*

Albert Einstein



# Índice

Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice .....	xi
Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas.....	xix
Abreviaturas e Símbolos .....	xxi
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1 - Enquadramento.....	1
1.1.1 - A Energia Eólica no Mundo.....	1
1.1.2 - Conceito de Microgeração .....	2
1.2 - Motivação .....	3
1.3 - Objectivos.....	4
1.4 - Estrutura da dissertação .....	4
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>5</b>
Pequenas Turbinas Eólicas .....	5
2.1 - Estado da arte .....	6
2.1.1 - Análise global .....	6
2.1.2 - Análise dos produtos de Mercado.....	16
2.2 - Descrição da tecnologia.....	19
2.3 - Constituição.....	20
2.3.1 - Torre .....	21
2.3.2 - Cabina.....	21
2.3.3 - Rotor .....	21
2.4 - Tipos de turbinas.....	22
2.4.1 - Rotores de eixo horizontal.....	22
2.4.2 - Rotores de eixo vertical.....	24
2.5 - Característica eléctrica de uma turbina eólica .....	25
2.6 - Controlo de potência .....	26
2.6.1 - Controlo por variação do passo .....	27

2.6.2 - Controlo por perda aerodinâmica .....	27
2.6.3 - Controlo por orientação direccional ( <i>yaw</i> ) .....	28
2.6.4 - Controlo por inclinação das pás ( <i>blade bending</i> ) .....	29
2.7 - Tipos de sistemas e suas aplicações .....	29
2.7.1 - Sistemas ligados à rede .....	29
2.7.2 - Sistemas isolados da rede .....	30
2.7.3 - Aplicações das pequenas turbinas eólicas .....	32
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>35</b>
Avaliação do recurso eólico.....	35
3.1 - Factores que condicionam o aproveitamento do potencial eólico.....	35
3.1.1 - Altura .....	35
3.1.2 - Orografia local .....	37
3.1.3 - Obstáculos e rugosidade .....	37
3.2 - Representação estatística da velocidade do vento.....	38
3.2.1 - Distribuição de Weibull .....	39
3.2.2 - Distribuição de Rayleigh .....	40
3.3 - Energia produzida .....	40
3.4 - Avaliação de locais com potencial eólico .....	44
3.5 - Estimação do recurso eólico .....	46
3.6 - Ambiente urbano .....	52
3.7 - Síntese da avaliação do recurso eólico.....	55
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>57</b>
Caso de Estudo.....	57
4.1 - Objectivos .....	57
4.2 - Cenários .....	58
4.2.1 - Cenário 1 .....	58
4.2.2 - Cenário 2 .....	59
4.2.3 - Cenário 3 .....	59
4.2.4 - Cenário 4 .....	60
4.3 - <i>Software Urbawind</i> .....	61
4.4 - Análise de dados .....	65
4.4.1 - Cenário 1 .....	66
4.4.2 - Cenário 2 .....	77
4.4.3 - Cenário 3 .....	80
4.4.4 - Cenário 4 .....	85
4.5 - Resumo final .....	91
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>95</b>
Análise Económica.....	95
5.1 - Fundamentos Genéricos .....	95
5.2 - Microgeração eólica .....	97
5.3 - O caso português para as energias renováveis .....	98
5.4 - Análise Económica do Caso de Estudo.....	98
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>103</b>
Conclusão e Trabalhos Futuros.....	103
<b>Anexo.....</b>	<b>105</b>
<b>Referências.....</b>	<b>107</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.1</b> - Capacidade eólica instalada a nível mundial entre 1996 e 2009 [1].....	1
<b>Figura 1.2</b> - Os dez países com maior capacidade instalada em 2009 [1].....	2
<b>Figura 2.1</b> - Mercado das pequenas turbinas eólicas nos Estados Unidos, em 2008 [5].....	8
<b>Figura 2.2</b> - Locais de implementação das pequenas turbinas eólicas nos Estados Unidos [5] .....	8
<b>Figura 2.3</b> - Evolução do mercado das microturbinas eólicas nos Estados Unidos [5].....	9
<b>Figura 2.4</b> - Tipo de sistema implementado/a implementar no Reino Unido [7] .....	10
<b>Figura 2.5</b> - Local de implementação das microturbinas eólicas no Reino Unido [7] .....	11
<b>Figura 2.6</b> - Distribuição do mercado das microturbinas eólicas por potência, no Reino Unido [7].....	11
<b>Figura 2.7</b> - Comparação entre o número de turbinas produzidas para o Reino Unido com as produzidas para exportação [7] .....	12
<b>Figura 2.8</b> - Plano nacional de acção para a eficiência energética [9].....	14
<b>Figura 2.9</b> - Distribuição Geral dos Fabricantes [5].....	16
<b>Figura 2.10</b> - Diferentes tipos de pequenas turbinas [18] .....	19
<b>Figura 2.11</b> - Constituintes da pequena turbina eólica [20] .....	20
<b>Figura 2.12</b> - Turbina com rotor de eixo horizontal .....	23
<b>Figura 2.13</b> - Representação de turbinas de eixo horizontal com configurações upwind e downwind [25] .....	23
<b>Figura 2.14</b> - Turbina com rotor de eixo vertical .....	24
<b>Figura 2.15</b> - Curva de potência de uma turbina para uma determinada velocidade do vento [21] .....	25
<b>Figura 2.16</b> - Eficiência de alguns modelos de pequenas turbinas [20] .....	25
<b>Figura 2.17</b> - Esquema de uma pá e respectivo ângulo de passo [21] .....	27

<b>Figura 2.18</b> - Sistema ligado à rede [5] .....	29
<b>Figura 2.19</b> - Esquema de implementação de um sistema isolado [30] .....	30
<b>Figura 2.20</b> - Esquema de implementação de um sistema híbrido [5] .....	31
<b>Figura 3.1</b> - Influência do relevo no recurso eólico [31].....	37
<b>Figura 3.2</b> - Esquema da influência de um obstáculo no fluxo do vento [25] .....	37
<b>Figura 3.3</b> - Distribuição de frequência da velocidade do vento [32] .....	39
<b>Figura 3.4</b> - Curva de distribuição de Weibull [32] .....	39
<b>Figura 3.5</b> - Perdas na velocidade do vento aquando da passagem deste por pás [33].....	42
<b>Figura 3.6</b> - Relação entre a velocidade média anual do vento (m/s) e a energia anual por m <sup>2</sup> (x1000 kWh/ano/m <sup>2</sup> ) [20] .....	43
<b>Figura 3.7</b> - Exemplo de rosa dos ventos e curva de distribuição da velocidade do vento [34].....	45
<b>Figura 3.8</b> - Relação entre a velocidade e a altura [34].....	46
<b>Figura 3.9</b> - Atlas Europeu do Vento [35] .....	48
<b>Figura 3.10</b> - Velocidade média horizontal a 60 metros (m/s), 1999 [36] .....	49
<b>Figura 3.11</b> - Relação entre o potencial eólico e a capacidade da rede [37] .....	50
<b>Figura 3.12</b> - Impacto do percurso do vento na base de um edifício cúbico [39] .....	52
<b>Figura 3.13</b> - Alteração do percurso do vento provocada por obstáculo [19].....	53
<b>Figura 3.14</b> - Projectos futuristas de aproveitamentos eólicos em ambientes urbanos [37] ..	54
<b>Figura 4.1</b> - Representação de Edifício Regular, de dimensões 8x8x9 metros, obtido por <i>Google SketchUp</i> .....	58
<b>Figura 4.2</b> - Representação de Edifício Irregular, de dimensões de base de 8x8x9 metros, obtido por <i>Google SketchUp</i> .....	59
<b>Figura 4.3</b> - Representação de Edifício Regular de 8x8x9 metros e de Edifício Irregular, de dimensões de base de 8x8x11 metros, obtido por <i>Google SketchUp</i> .....	60
<b>Figura 4.4</b> - Representação de uma rua, com edifícios de várias dimensões, obtido por <i>Google SketchUp</i> .....	60
<b>Figura 4.5</b> - Local de introdução de dados relativos à área de análise, por <i>Urbawind</i> . ....	61
<b>Figura 4.6</b> - Local de introdução de dados relativos aos edifícios para análise, por <i>Urbawind</i> . ....	62
<b>Figura 4.7</b> - Introdução de dados relativos às áreas de interesse, de forma a criar superfícies, por <i>Urbawind</i> . ....	62
<b>Figura 4.8</b> - Introdução de dados relativos às áreas de interesse, de forma a criar superfícies, por <i>Urbawind</i> . ....	63

<b>Figura 4.9</b> - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de <i>Hautes-Alpes</i> para as condições base, por <i>Urbawind</i> . ....	64
<b>Figura 4.10</b> - Curva de potência da pequena turbina eólica, facultada por <i>Urbawind</i> . ....	65
<b>Figura 4.11</b> - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	66
<b>Figura 4.12</b> - Representação de um plano horizontal, com 9 metros de altura, obtido por <i>Urbawind</i> . ....	67
<b>Figura 4.13</b> - Representação de um plano horizontal, com 15 metros de altura, obtido por <i>Urbawind</i> . ....	67
<b>Figura 4.14</b> - Representação da rajada de vento verificada num plano horizontal, com 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	68
<b>Figura 4.15</b> - Representação da aceleração média do vento verificada num plano vertical, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	69
<b>Figura 4.16</b> - Representação da aceleração média do vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	69
<b>Figura 4.17</b> - Representação da aceleração média do vento verificada num plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	70
<b>Figura 4.18</b> - Representação da turbulência do vento verificada num plano vertical, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	70
<b>Figura 4.19</b> - Representação da turbulência do vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	71
<b>Figura 4.20</b> - Representação da turbulência do vento verificada num plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	71
<b>Figura 4.21</b> - Representação da pressão causada pelo vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	72
<b>Figura 4.22</b> - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de <i>Hautes-Alpes</i> para o cenário 1, por <i>Urbawind</i> . ....	73
<b>Figura 4.23</b> - Representação da velocidade média pontual do vento, num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	74
<b>Figura 4.24</b> - Representação da velocidade média pontual do vento, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	74
<b>Figura 4.25</b> - Representação da produção, num plano vertical, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	75
<b>Figura 4.26</b> - Representação da turbulência, num plano vertical, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	75
<b>Figura 4.27</b> - Representação do parâmetro A da distribuição de Weibull, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	76
<b>Figura 4.28</b> - Representação do parâmetro k da distribuição de Weibull, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	76

<b>Figura 4.29</b> - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	77
<b>Figura 4.30</b> - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	78
<b>Figura 4.31</b> - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de <i>Hautes-Alpes</i> para o cenário 2, por <i>Urbawind</i> . ....	78
<b>Figura 4.32</b> - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	79
<b>Figura 4.33</b> - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	80
<b>Figura 4.34</b> - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	81
<b>Figura 4.35</b> - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	82
<b>Figura 4.36</b> - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de <i>Hautes-Alpes</i> para o cenário 3, por <i>Urbawind</i> . ....	82
<b>Figura 4.37</b> - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	83
<b>Figura 4.38</b> - Representação da produção do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	84
<b>Figura 4.39</b> - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	84
<b>Figura 4.40</b> - Representação de um plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	85
<b>Figura 4.41</b> - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, com direcção de 90°, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	86
<b>Figura 4.42</b> - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, com direcção de 360°, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	87
<b>Figura 4.43</b> - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 0,5 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	88
<b>Figura 4.44</b> - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de <i>Hautes-Alpes</i> para o cenário 3, por <i>Urbawind</i> . ....	88
<b>Figura 4.45</b> - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	89
<b>Figura 4.46</b> - Representação da produção anual num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	90
<b>Figura 4.47</b> - Representação da turbulência registada num plano horizontal a 0,5 metros de altura, obtido através de <i>Urbawind</i> . ....	91
<b>Figura 5.1</b> - O custo da energia eólica [44].....	96



<b>Figura 5.2</b> - Comparação entre investimento eólico e petróleo e CO <sub>2</sub> evitados [44].....	96
<b>Figura 5.3</b> - Representação do ponto escolhido para a avaliação da viabilidade económica.....	99



## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Vendas globais de microturbinas eólicas em 2008 [5].....	6
Tabela 2.2 – Comparação entre sistemas isolados e ligados à rede [5] .....	7
Tabela 2.3 - Previsões para 2020 e 2040 [7] .....	12
Tabela 2.4 - Tarifas de referência para microprodução, 2008 [8] .....	13
Tabela 2.5 - Empresas a destacar pelo fabrico de pequenas eólicas [5] .....	17
Tabela 2.6 - Classificação das pequenas turbinas eólicas [4] .....	19
Tabela 2.7 - Aplicações das turbinas [4] .....	32
Tabela 3.1 - Variação do factor $n$ para diferentes tipos de superfície [31] .....	36
Tabela 3.2 - Variação do factor $Z_0$ para diferentes tipos de superfície [31].....	37
Tabela 3.3 - Energia anual estimada para pequenas turbinas eólicas [20] .....	42
Tabela 5.1 – Análise da viabilidade económica do caso de estudo (1,77 MWh/ano).....	101



# Abreviaturas e Símbolos

APREN	Associação de Energias Renováveis
AWEA	<i>American Wind Energy Association</i>
BWEA	<i>British Wind Energy Association</i>
CanWEA	<i>Canadian Wind Energy Association</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
ENE	Estratégia Nacional de Energia
ESCo	<i>Energy Service Company</i>
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MM5	Modelo de Mesoescala de quinta geração
NEPs	Número de horas equivalentes à potência nominal
O&M	Operação e Manutenção
RANS	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
RCWEAF	<i>Research centre for wind energy and atmospheric flows</i>
WA <sup>S</sup> P	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Enquadramento

#### 1.1.1 - A Energia Eólica no Mundo

A energia proveniente do vento tem sido uma grande e notória aposta dos países, apesar da crise económica e financeira. A utilização deste recurso tornou-se comum devido à tecnologia implícita, que apresenta várias qualidades nas quais se destacam ser renovável, fiável e de fácil instalação. Segundo o *Global Wind Energy Council* - GWEC, o aproveitamento deste recurso a nível mundial cresceu 31% no ano de 2009, acrescentando 37,5 GW e perfazendo assim 157 GW instalados. Esta evolução encontra-se expressa na figura 1.1.

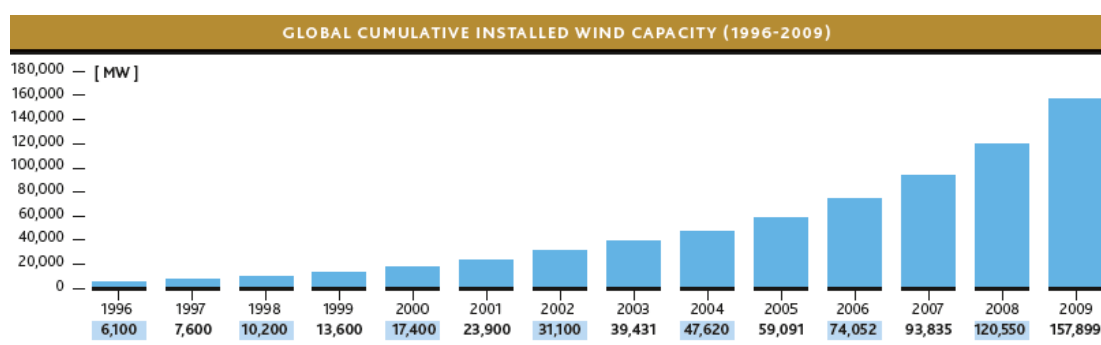


Figura 1.1 - Capacidade eólica instalada a nível mundial entre 1996 e 2009 [1]

Este crescimento contribui para um peso ainda mais significativo do recurso eólico nos mercados energéticos mundiais. O GWEC estima também que a indústria eólica emprega cerca de meio milhão de pessoas em todo o mundo. Quanto às emissões de dióxido de carbono, este recurso participa de forma activa na sua redução. Recorrendo também aos dados fornecidos pelo GWEC, e de acordo com a produção no ano de 2009 (já referida acima), será possível poupar 204 milhões de toneladas de dióxido de carbono por ano. Trata-se de

mais uma razão que leva a optar pela energia eólica que, não sendo apenas atractiva em termos económicos, também o é ambientalmente.

Portugal encontra-se bem posicionado a nível mundial relativamente à capacidade eólica acumulada, instalada até 2009, como se pode comprovar a partir da figura 1.2.

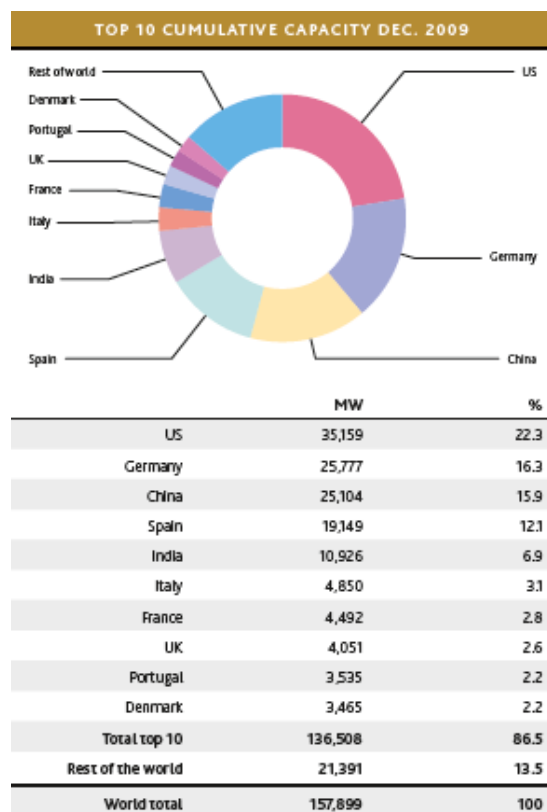


Figura 1.2 - Os dez países com maior capacidade instalada em 2009 [1]

Embora a energia eólica à grande escala tenha um impacto bastante mais significativo nos resultados apresentados, também à pequena escala se têm verificado notórias evoluções. O progresso referido será apresentado aprofundadamente mais adiante, devido a retratar o assunto deste trabalho.

### 1.1.2 - Conceito de Microgeração

O assunto desta dissertação assenta no conceito de microgeração, pelo que será referido no enquadramento mas apenas de forma introdutória.

A microgeração, ou produção distribuída, está relacionada com a geração de energia eléctrica ou térmica pelo próprio consumidor, através de equipamentos de pequena escala. Este novo conceito assenta numa mudança de paradigma provocada pela expansão das energias endógenas, pela emergência de uma nova geração que para além de consumidor é também produtor (um novo conceito, denominado *Prosumer*, que faz a junção entre *producer* e *consumer* ou produtor e consumidor, respectivamente), pela introdução de novas tecnologias de informação e comunicação nas redes de baixa tensão, agora ligadas a pequenos equipamentos, bem como um novo conceito de gestão das redes eléctricas adaptadas aos requisitos de descentralização da produção.



Relativamente aos recursos energéticos renováveis e respectivas tecnologias de extracção, para além das pequenas turbinas eólicas, assunto desta dissertação, incluem-se os painéis fotovoltaicos, os colectores térmicos, as mini-hídricas, as microturbinas, entre outras fontes. Uma vez que incidem essencialmente em fontes de energia renovável, este sistema de geração energética melhora o desempenho ambiental do sistema eléctrico no seu todo. A microgeração possui então enormes vantagens em termos não só ambientais como também económicos e tecnológicos, tais como [2]:

1. Equilíbrio de forma dinâmica dos mercados de electricidade, podendo produzir mais nos períodos de grande procura e menos quando há pouca procura;
2. Contribuição para a redução da forte dependência energética do sistema energético português relativamente ao exterior;
3. Redução das perdas de energia na rede de distribuição eléctrica;
4. Aumento da fiabilidade do fornecimento de electricidade aos consumidores;
5. Criação de oportunidade para a indústria portuguesa de bens e equipamentos para o sector eléctrico, assim como empregos, levando ao crescimento económico do país;
6. Aumento da autonomia e do poder de decisão dos consumidores individuais e das comunidades locais.
7. Especialmente em locais cuja rede eléctrica tem fraca capacidade de recepção de produção eléctrica, ou que a rede eléctrica não alcança, normalmente em locais com baixa densidade populacional, as pequenas turbinas eólicas podem constituir uma alternativa favorável.

Os pontos expostos anteriormente denotam a importância de criação de oportunidades para a microgeração, com a implementação legal de incentivos por parte do Estado. A lei actual referente a este tema será abordada mais adiante, no Capítulo 2.

Relativamente às razões de predilecção das pequenas turbinas eólicas relativamente às turbinas de grande dimensão pode apontar-se principalmente o inferior custo dispendido devido a não ser necessária a utilização de gruas nem a construção de vias de comunicação que permitam o transporte dos componentes da turbina eólica. Por outro lado, e dependendo das pessoas e das suas noções estéticas, a pequena turbina eólica pode constituir uma preferência uma vez que as suas dimensões não são tão marcantes no ambiente em que se encontram [3].

## 1.2 - Motivação

Os maiores desafios da sociedade actual estão relacionados por um lado com questões ambientais e por outro lado com a escassez dos combustíveis fósseis. Surgem assim as energias renováveis como resposta às preocupações mencionadas. Tendo Portugal excelentes recursos renováveis, emerge uma oportunidade única para solucionar não só os problemas referidos como a sua forte dependência energética externa.

A produção dispersa teve então um papel fulcral no aproveitamento dos recursos endógenos, criando o conceito de fusão do papel de produtor com o de consumidor, num paradigma de produção para consumo próprio.

A abordagem deste tema, focalizado na energia eólica, é portanto aliciante.

### 1.3 - Objectivos

Os objectivos desta dissertação envolvem a apreciação do conceito de microgeração relativamente ao recurso eólico.

Será efectuado um estudo teórico preliminar relativamente ao tema e às suas várias componentes, para posteriormente serem efectuadas simulações, em ambientes hipotéticos, para aferir a influência de diversos parâmetros na avaliação do potencial eólico.

Apenas após esta análise se poderão obter conclusões sobre a viabilidade de implementação de pequenas turbinas eólicas em regime de microgeração.

### 1.4 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação é constituída por mais seis capítulos, cuja divisão é estabelecida pelo assunto a abordar. Assim sendo:

O presente capítulo, Capítulo 1, é um capítulo introdutório que faz o enquadramento do tema da dissertação, exprime a motivação, os objectivos e a sua estrutura.

O Capítulo 2 faz um enfoque nas Pequenas Turbinas Eólicas como o estado da arte e aspectos relativos à tecnologia implícita, tais como a descrição da tecnologia e sua constituição.

O Capítulo 3 diz respeito à Avaliação do Recurso Eólico, referindo os factores que o condicionam e a energia que é possível obter consoante estes factores.

O Capítulo 4 aborda o Caso de Estudo efectuado relativamente à avaliação do potencial eólico. É apresentada a descrição do programa a utilizar bem como os resultados obtidos mais relevantes.

O Capítulo 5 expõe uma Análise Económica, com cálculos efectuados de acordo com a remuneração vigente em Portugal de forma a aferir se existe viabilidade económica na implantação de uma pequena turbina num determinado local.

O Capítulo 6 apresenta as Conclusões retiradas do estudo efectuado bem como indicações para possíveis Trabalhos Futuros.

## Capítulo 2

# Pequenas Turbinas Eólicas

A Energia Eólica tem origem na radiação solar e nos processos de aquecimento das massas de ar que provocam diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas. Este fenómeno, por sua vez, contribui para o deslocamento de massas de ar, originando assim o recurso eólico, de elevado potencial em várias regiões do mundo.

Esta forma de extracção de energia possui numerosas vantagens para vários sectores. Quanto à sociedade, os aspectos positivos deste recurso são o facto de ser uma energia inesgotável e limpa, não emitindo portanto gases poluentes, resíduos e diminuindo a emissão de gases de estufa. No que toca às comunidades onde são introduzidos os parques eólicos, estas beneficiam através da criação de empregos, do investimento em zonas desfavorecidas e em benefícios financeiros, sem que o terreno seja inutilizado para outros fins como a agricultura. Também o Estado português lucra com a implementação de energia eólica no país uma vez que, para além da redução da elevada dependência energética externa, são reduzidas as penalizações pelo incumprimento do protocolo de Quioto e pela menor aquisição de direitos de emissão de dióxido de carbono. Esta energia é também competitiva com as fontes de energia tradicionais. Quanto aos promotores, as grandes vantagens são os aerogeradores não necessitarem de abastecimento de combustível, requererem reduzida manutenção e possuírem favorável rentabilidade de investimento.

A energia eólica é influenciada por vários factores tais como a altura, orografia, rugosidade do solo e obstáculos, que serão desenvolvidos mais adiante, em 3.1.

De forma a efectuar a extracção do recurso eólico, são utilizadas turbinas eólicas ou aerogeradores. As turbinas eólicas são portanto geradores eléctricos que convertem a energia cinética, proveniente do vento, em energia eléctrica.

Devido ao tema ser relativo à geração de energia eólica mas à pequena escala, microgeração, será dado um enfoque nas turbinas de pequenas dimensões. Importa referir que as turbinas eólicas de pequena dimensão não são concorrentes com as de grande dimensão, mas sim tecnologias complementares.

## 2.1 - Estado da arte

### 2.1.1 - Análise global

O mercado das microturbinas eólicas tem crescido de forma galopante. Este crescimento deve-se ao investimento neste recurso, nos seus vários segmentos de mercado, permitindo desta forma o aumento da produção. O segmento residencial (1-10kW) é o líder de mercado não só devido ao investimento e economias de escala resultantes da produção mas também devido ao processo de consciencialização do consumidor e ao aumento dos preços de electricidade residencial.

Não obstante, e comparando com as eólicas de grande potência, as pequenas eólicas ainda estão num estado prematuro e pouco competitivo em termos financeiros [4].

As pequenas turbinas têm bastante potencial mas ainda têm vários desafios pela frente, tais como a sua regularização. Embora já existam normas de design específicas para as pequenas turbinas (IEC61400) e algumas das normas para as grandes turbinas lhes possam ser aplicadas, são necessários mais critérios para que a sua utilização se torne mais simples para os consumidores. Também a ligação à rede (para sistemas que assim o exigem) e as restrições de instalação terão ainda de ser aperfeiçoadas para que se constate uma maior integração destes sistemas no mercado energético. Verifica-se, no entanto, um crescimento de investimento nesta tecnologia nos países desenvolvidos e ainda mais nos subdesenvolvidos devido à sua necessidade crescente de energia.

A tabela 2.1 apresenta as vendas globais de equipamento de geração eólica de pequena escala:

**Tabela 2.1 – Vendas globais de microturbinas eólicas em 2008 [5]**

Vendas Globais em 2008
38,7 MW
53% crescimento relativamente a 2007
19 000 unidades
156 Milhões dólares de vendas

Como é possível observar através da tabela anterior, o seu crescimento tem sido notável (53% relativamente ao ano anterior) e as suas vendas cada vez mais consideráveis.

Os sistemas podem ser isolados ou ligados à rede. Dentro do mercado de sistemas isolados, os sistemas eólicos de pequena dimensão para aplicações doméstica ou móvel (principalmente os mercados de caravanas ou barcos) são os mais procurados.

Em constante evolução mundial é de frisar os sistemas híbridos de energia que, como o nome indica, fazem a conjugação de mais que uma fonte de energia. Desta forma, e dada a capacidade de uma fonte suprir a falta temporária de outra, é gerada energia eléctrica de

forma otimizada e com custos reduzidos, permitindo que ambas as fontes operem com o mínimo de interrupções tendo, por este facto, maior fiabilidade. Estes sistemas são considerados uma aplicação promissora para comunidades isoladas, onde a alternativa de provimento de energia por extensão da rede eléctrica é técnica e economicamente desaconselhada.

Os sistemas híbridos mais frequentes são a conjugação da energia solar e eólica, podendo realçar-se a China, que aplicou esta tecnologia na electrificação de zonas rurais. Os sistemas *wind-diesel* também requerem atenção, podendo frisar o Alasca, Canadá e Austrália na sua aplicação.

A tabela 2.2 ilustra a preferência mundial das pequenas turbinas eólicas em sistemas isolados, no ano de 2008.

**Tabela 2.2 – Comparação entre sistemas isolados e ligados à rede [5]**

<b>Total no mundo em 2008</b>	<b>unidades</b>	<b>kW</b>
Sistemas isolados	13 902	7 536
Sistemas ligados à rede	4 992	26 065
<b>Total</b>	<b>18 894</b>	<b>33 601</b>

A observação da tabela 2.2 permite concluir que, embora as unidades instaladas em sistemas isolados seja superior, as potências dessas turbinas são muito reduzidas, apenas para pequenas aplicações. No caso de sistemas ligados à rede, a potência instalada é muito mais considerável. Em áreas cuja rede eléctrica é densa, com uma forte rede emalhada, a necessidade de recurso a sistemas isolados não é tão frequente.

#### **2.1.1.1 - Mercado norte-americano**

O destaque vai para o mercado norte-americano, que representa aproximadamente um terço do mercado mundial (66 de 209 fabricantes).

De acordo com os diferentes segmentos, apenas para o sector das pico turbinas eólicas (potências menores que 1 kW) é que o sistema isolado é dominante. Para os outros sectores, de aplicações residenciais e comerciais, prevalece o sistema ligado à rede (em termos de kW), como é possível observar através do seguinte gráfico, figura 2.1.

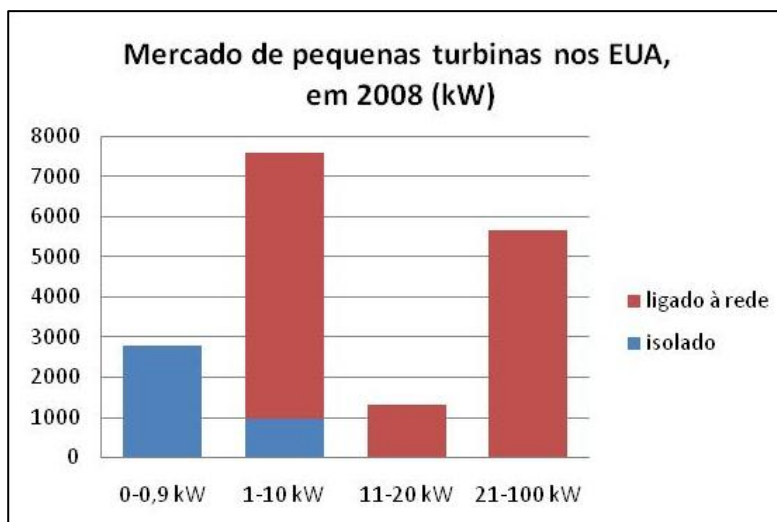


Figura 2.1 - Mercado das pequenas turbinas eólicas nos Estados Unidos, em 2008 [5]

O espaço preferido à implementação das pequenas turbinas eólicas é também um ponto relevante. No aproveitamento eólico à pequena escala, as pequenas turbinas eólicas colocadas em torre dominam as colocadas em telhados. A figura 2.2 representa então esta preferência, com um enorme destaque para a implementação em torre.

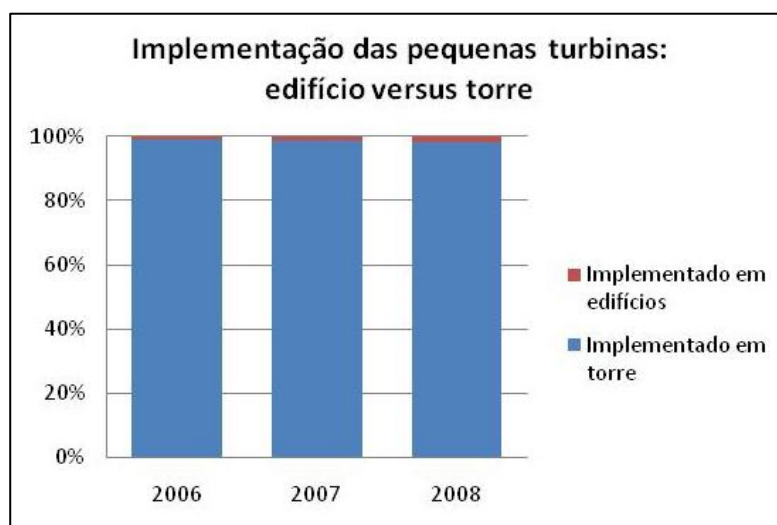


Figura 2.2 - Locais de implementação das pequenas turbinas eólicas nos Estados Unidos [5]

A figura 2.2 revela, portanto, o destaque referido relativamente às implementações em torre. Todavia, de 2006 a 2008, e embora reduzida, as implementações em edifícios ganharam notoriedade. Esta ascensão deve-se ao crescimento da sua implementação em ambiente urbano, uma vez que o espaço predominante para a sua colocação neste tipo de ambiente é no topo dos edifícios.

Como se tem vindo a constatar, o mercado das microturbinas tem estado em permanente ascensão. Este crescimento evidencia-se no gráfico seguinte, figura 2.3.

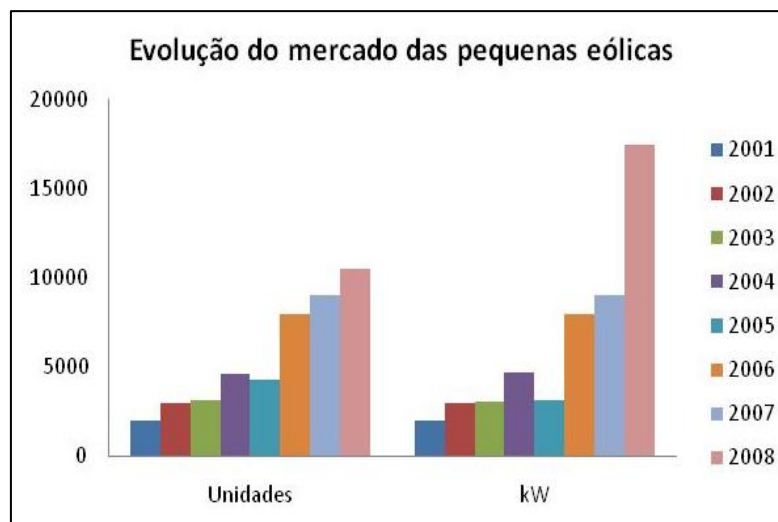


Figura 2.3 - Evolução do mercado das microturbinas eólicas nos Estados Unidos [5]

Os dados expostos no último gráfico dizem respeito ao crescimento do mercado norte-americano até 2008. No entanto, já há previsões a longo prazo e bastante promissoras, de acordo com a AWEA. Apesar da crise económica, os fabricantes prevêem que o mercado, em menos de cinco anos, aumente cerca de 30 vezes.

#### 2.1.1.2 - Mercado Europeu - Reino Unido

Não só na América do Norte mas também na Europa, a tecnologia eólica desenvolve-se a passos largos. No ano de 2009 foram instalados 10.163 MW de potência eólica, que corresponde a um número 23% superior ao ano antecedente. Para além disso, no mesmo ano, é de frisar que foi instalada mais capacidade eólica que qualquer outra forma de geração de electricidade, equivalente a 39% do número total de instalações. A aposta nesta energia deve muito ao investimento que nela foi efectuado em 2009, correspondente a 13 milhões de euros [6].

No que respeita a microeólica, o Reino Unido é o líder europeu da geração à pequena escala e exporta cerca de 40 % da sua produção para o mercado internacional. Os gráficos seguintes reflectem o sucesso das microeólicas no mercado Inglês, de acordo com dados da *British Wind Energy Association* - BWEA. Os valores dizem respeito ao total unitário acumulado. O relatório consultado é de 2009, ou seja, os dados de 2009 e 2010 baseiam-se em previsões e perspectivas de evolução do mercado.

Os sistemas podem ser do tipo isolado da rede eléctrica ou ligado a esta. A figura 2.4 apresenta a preferência inicial de sistemas isolados e a crescente primazia dos sistemas ligados à rede, em termos unitários.

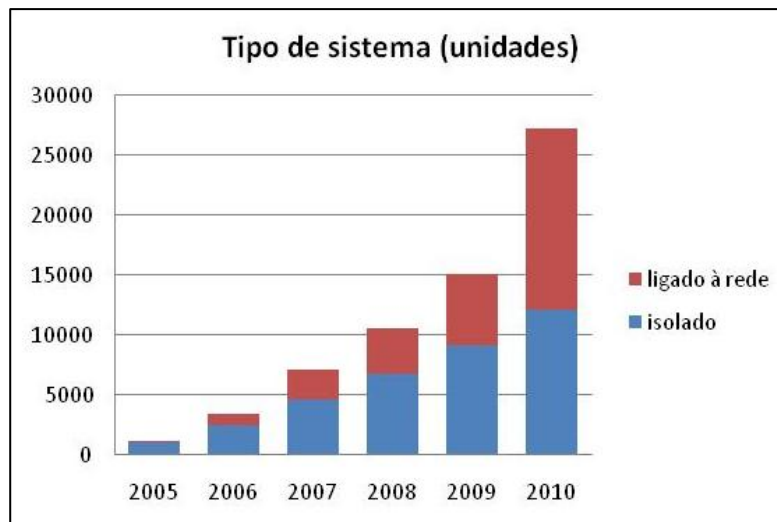
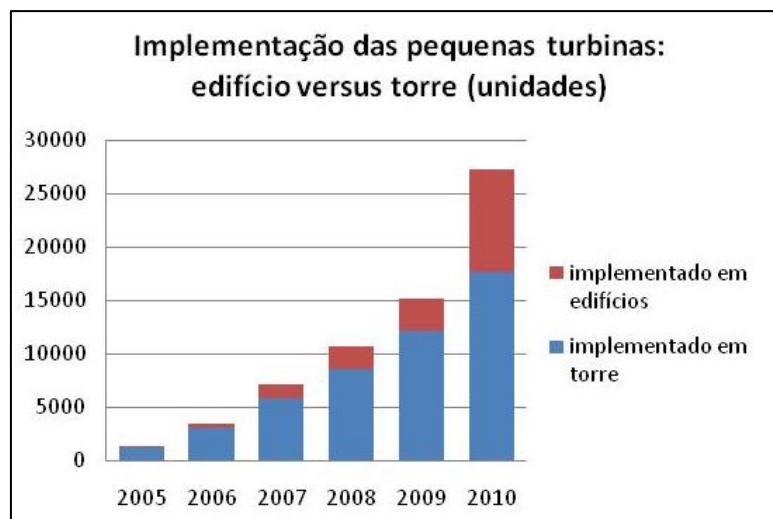


Figura 2.4 - Tipo de sistema implementado/a implementar no Reino Unido [7]

A BWEA prevê que a tecnologia de pequenas turbinas ligadas à rede seja uma área de crescimento muito significativo no futuro. Inicialmente a maior vantagem deste tipo de tecnologia era a geração de energia em locais em que não havia rede eléctrica, ou era pouco densa, e que portanto a solução mais viável em termos técnicos e económicos era a microgeração em sistema isolado. Actualmente, as perspectivas divergem um pouco uma vez que a ligação das microturbinas à rede, para além das vantagens associadas aos sistemas isolados como, por exemplo, a utilização de energias limpas e a redução da dependência energética, traz ainda inúmeros benefícios acrescidos, tais como a produção junto do local de consumo, que reduz as perdas energéticas na rede e a necessidade manutenção, o que consequentemente conduz a vantagens económicas. Quanto ao tipo isolado prevê-se assim um crescimento mais constante. Estas aplicações são mais direccionadas para actividades de lazer e segmentos industriais.

Relativamente ao tipo de instalação, as turbinas implementadas em torre continuarão, por enquanto, a constituir a parte mais significativa, relativamente às turbinas integradas em edifícios uma vez que estas últimas são ainda uma nova aplicação desta tecnologia.

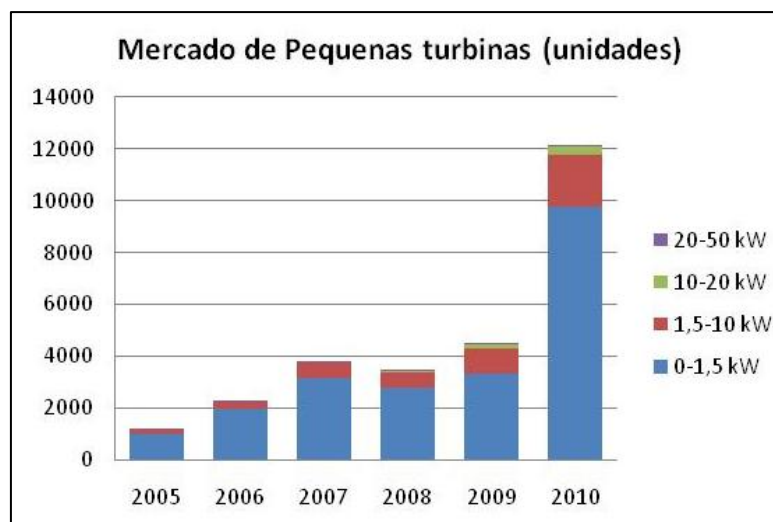




**Figura 2.5** - Local de implementação das microturbinas eólicas no Reino Unido [7]

Tal como apresenta a figura 2.5, e assim como no mercado norte-americano, as implementações em torre prevalecem ainda sobre as integradas em edifícios. No entanto, com o desenvolvimento da tecnologia, as implementações em edifícios revelarão uma forte tendência de crescimento, como aliás é já notório nas previsões de 2009 e 2010.

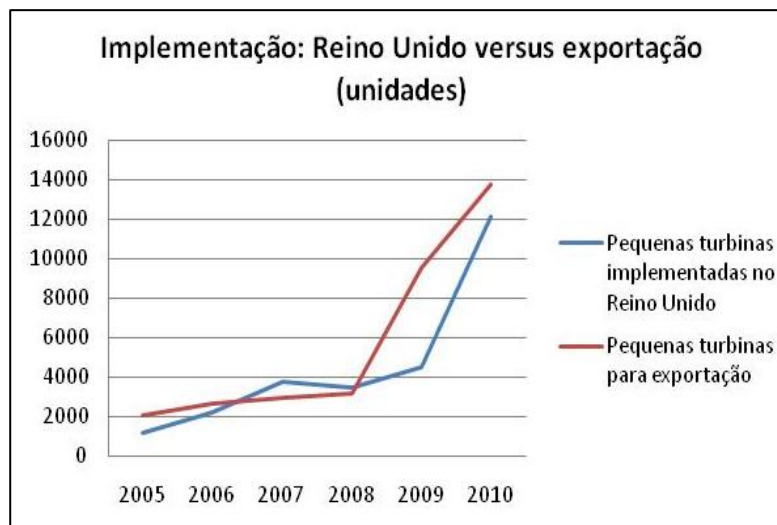
A distribuição de pequenas turbinas por tipos evidencia o destaque das turbinas de muito pequeno porte relativamente às restantes. A figura seguinte diz respeito às implementações das turbinas de diferentes secções (em unidades) ao longo dos últimos anos.



**Figura 2.6** - Distribuição do mercado das microturbinas eólicas por potência, no Reino Unido [7]

É bastante evidente a primazia das turbinas de muito pequena potência (0 a 1,5 kW) relativamente às restantes qualificações. A comparação com o mercado norte-americano neste ponto não poderá ser efectuada com muita precisão uma vez que a nomenclatura das pequenas turbinas é diferente da do Reino Unido.

O Reino Unido regista um forte investimento na exportação. O gráfico seguinte, figura 2.7, demonstra a comparação entre a implementação de pequenas turbinas no Reino Unido e as destinadas a exportação, ambas fabricadas no país.



**Figura 2.7** - Comparação entre o número de turbinas produzidas para o Reino Unido com as produzidas para exportação [7]

Relativamente aos mercados respeitantes aos anos de 2009 e 2010, a rápida expansão dos mercados de exportação é apenas uma previsão baseada nas tendências constatadas no mercado.

O ano de 2009 já consiste então na prevalência de turbinas exportadas pelos fabricantes do Reino Unido relativamente às instaladas no próprio país. Este crescimento na exportação deve-se às actuais taxas de câmbio da libra inglesa em relação ao euro e à crescente procura da tecnologia.

O Reino Unido tem como objectivos instalar 1.300 MW de pequenas turbinas até 2020, segundo dados da BWEA. Apesar de ambiciosos, tendo em conta a evolução desta tecnologia nos últimos anos, tudo indica que esta tendência se possa de facto confirmar. A tabela 2.3 apresenta os dados referenciados.

**Tabela 2.3** - Previsões para 2020 e 2040 [7]

Indicadores	2020	2040
Unidades Instaladas	600 000	4 000 000
Potência Instalada (GW)	1,3	8,75
Electricidade Consumida (TWh/ano)	1,7	11,1

#### 2.1.1.3 - Mercado Europeu -Portugal

Em Portugal, aquando da entrada em vigor do primeiro decreto-lei que visava a geração distribuída (Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março) estabeleceu-se que a electricidade

produzida se destinasse predominantemente a consumo próprio, sendo o excedente passível de ser entregue a terceiros ou à rede pública, com o limite de 150 kW de potência no caso de a entrega ser efectuada à rede pública.

No entanto, esta medida não obteve os resultados pretendidos uma vez que, segundo António Sá da Costa, Presidente da APREN, a legislação em vigor conduzia a uma excessiva centralização administrativa dos processos de licenciamento e não garantia uma remuneração justa de energia eléctrica produzida e injectada na rede. O número de sistemas de microprodução de electricidade não atingiu, portanto, expressão significativa.

Mais tarde, em 2007, entrou em vigor um novo decreto-lei (Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro) aplicável à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência [8].

Foram criados dois regimes remuneratórios:

- Regime remuneratório geral: a potência de ligação está limitada a 50% da potência já contratada no contrato de compra de electricidade a um máximo de 5,75 kW e o preço de venda de electricidade é igual ao preço de compra.

- Regime remuneratório bonificado: a potência de ligação está limitada até 3,68 kW.

Segundo o artigo 11º do referido Decreto-Lei, a tarifa única de referência é aplicável à energia produzida no ano da instalação (denominado vulgarmente de ano zero) e aos cinco anos civis seguintes. Para os primeiros 10 MW de potência de ligação registados no país, a tarifa de referência é de 650 €/MWh. O tarifário de referência previsto depende do tipo de energia renovável utilizada, mediante a aplicação das seguintes percentagens à tarifa de referência, nas quais, por exemplo, a solar é 100% e a eólica 70%.

A tabela 2.4 apresenta a tarifa respectiva a cada unidade de microprodução, para o ano de 2008.

**Tabela 2.4 - Tarifas de referência para microprodução, 2008 [8]**

Unidade de microprodução	Tarifa (€/kWh)
Solar	0,650
Eólica	0,455
Hídrica	0,195
Cogeração e Biomassa	0,195
Pilhas de combustível	*

\* aplicável à tecnologia renovável utilizada na produção de hidrogénio

No entanto, por cada 10 MW adicionais de potência de ligação registada a nível nacional, a tarifa única aplicável é sucessivamente reduzida de 5%.

Neste momento, a tarifa correspondente à unidade de microgeração solar encontra-se em 0,5573 €/kWh. Como a parcela da eólica é 70% desta, o valor da remuneração eólica é de 0,3901 €/kWh.

Após o período de 5 anos (acrescido do ano zero) e durante o período adicional de 10 anos, aplica-se à instalação de microprodução, anualmente, a tarifa única correspondente à que seja aplicável no primeiro dia desse ano, às novas instalações que sejam equivalentes.

Após o último período referido, aplica-se à instalação de microprodução o regime geral.

Todo este processo de cálculo será detalhado mais adiante no Capítulo 5, referente à Análise Económica.

Com os incentivos referidos, os particulares podem produzir electricidade proveniente de sistemas de microgeração para a rede, no âmbito do regime bonificado, desde que seja respeitado o limite máximo legal estabelecido de 4 MWh por ano por cada kW instalado, para o caso da energia eólica.

Os interessados na microprodução não se baseiam apenas em questões ecológicas. A mais forte convicção resume-se, na maioria dos casos, a uma oportunidade de negócio que perdurará desde que a tarifa estabelecida compense.

A electricidade produzida num sistema de microgeração tem a vantagem de ser remunerada por um preço muito superior ao que um produtor paga nas suas contas mensais (0,1285 €/kWh para tarifa simples e potência contratada até 20,7 kVA), como é possível constatar comparando estes preços aos apresentados na tabela 2.4. Assim sendo, e de forma a que o investimento seja recuperado em tempo útil, a lei prevê a venda completa de electricidade à rede, evitando assim o uso de baterias dispendiosas e que necessitariam de elevada manutenção. Para o caso da energia eólica, regista-se um benefício superior a 350 por cento. Ainda melhor acontece para o caso da energia solar. Quanto às restantes fontes de energia renovável, estas ainda não são compensatórias em termos financeiros, uma vez que o período de retorno é ainda bastante elevado, devido à sua baixa tarifa de remuneração.

O objectivo é, em 2015, atingir os 165 MW de potência instalada em microgeração que não parece difícil de alcançar devido ao interesse evidenciado nos processos de pré-registo realizados.

Para além da crescente aposta na microprodução, também a potência máxima que pode ser instalada cresce a 20% ao ano. A figura 2.8 apresenta a evolução dos MW instalados.

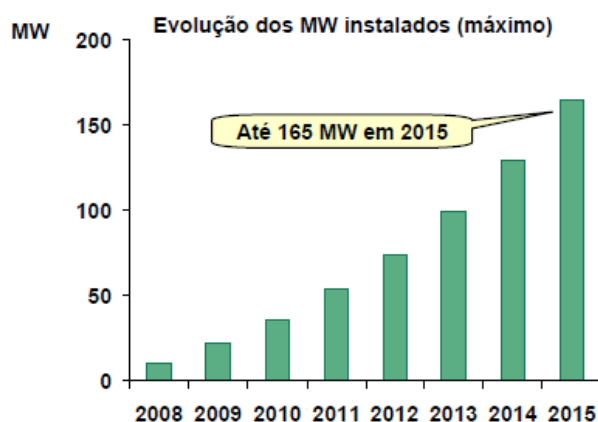


Figura 2.8 - Plano nacional de acção para a eficiência energética [9]

Segundo as previsões do INESC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, no cenário mais favorável, a microgeração a partir de energias renováveis poderá atingir os 30% da energia consumida em baixa tensão, alcançando 1700 MW de potência instalada, correspondente à produção anual de 4900 GWh. Num cenário mais realista, assumindo 10% de penetração na rede, esta forma de produção de energia poderá contribuir anualmente com 1600 GWh, provenientes de uma potência instalada de 570 MW [10].

Um estudo sobre o impacto da microgeração na rede eléctrica, por João Peças Lopes, revela a possibilidade de evitar a perda de 3437 GWh por ano, equivalente a 22 milhões de euros e 370 toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas.

Em Portugal foi criado um Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética - Portugal Eficiência 2015, que se resume a um conjunto de medidas de eficiência energética até esta data, no qual se integram medidas referidas anteriormente. Este plano visa a substituição de fontes de energia fóssil por energia renovável. Embora estejam envolvidas quatro áreas (transportes, residencial e serviços, indústria e Estado) apenas duas delas poderão ter influência no mercado da microprodução. São elas a área residencial e serviços, que através do programa *Renováveis na Hora* procuram a integração de energias renováveis neste sector, e a área Estado, também agrupada num programa de Eficiência Energética no Estado, que é aplicável em edifícios, frotas de transporte e iluminação pública.

A estratégia apresentada, para além de constituir uma orientação fundamental para os investimentos e a evolução do sistema energético para os próximos dez anos, constitui uma preparação do país para a mudança de paradigma que está em curso, e que consiste na descentralização do sistema energético, numa produção mais limpa e centrada nas fontes renováveis, e de uma maior eficiência na utilização, graças em particular a tecnologias inovadoras de redes inteligentes e gestão da energia.

A energia eólica é uma das energias renováveis mais maduras, com aplicação em vários sectores. No entanto, a sua real aplicação em edifícios irá depender do potencial do recurso no local, da natureza da aplicação e do espaço do edifício em causa. Atendendo a estes factores, e segundo o plano *Renováveis na Hora*, está prevista a instalação de eólicas em 5000 edifícios. Esta parcela representa 9 % das instalações, e não da potência instalada, do plano de implementações até 2015.

Relativamente ao Plano de Eficiência Energética no Estado, está prevista a instalação de 15 MW de potência em 2500 escolas, proveniente de Energias renováveis.

Foi também aprovado, em Março de 2010, um Plano Nacional de Estratégia para a Energia com horizonte temporal de 2020 - ENE 2020 [11]. Os seus objectivos principais assentam no crescimento, na competitividade e na independência energética e financeira. A aposta será sem dúvida nas Energias Renováveis, na promoção da eficiência energética (que envolve a actualização do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética referido anteriormente), na garantia e segurança do abastecimento energético e finalmente na sustentabilidade da estratégia energética.

As metas definidas na ENE 2020 passam, por exemplo, pela redução de 74% da dependência energética de Portugal relativamente aos outros países, passando a produzir, até 2020, 31% da energia final. Uma outra meta a atingir em 2020 diz respeito aos compromissos que Portugal assumiu no contexto europeu de combate às alterações

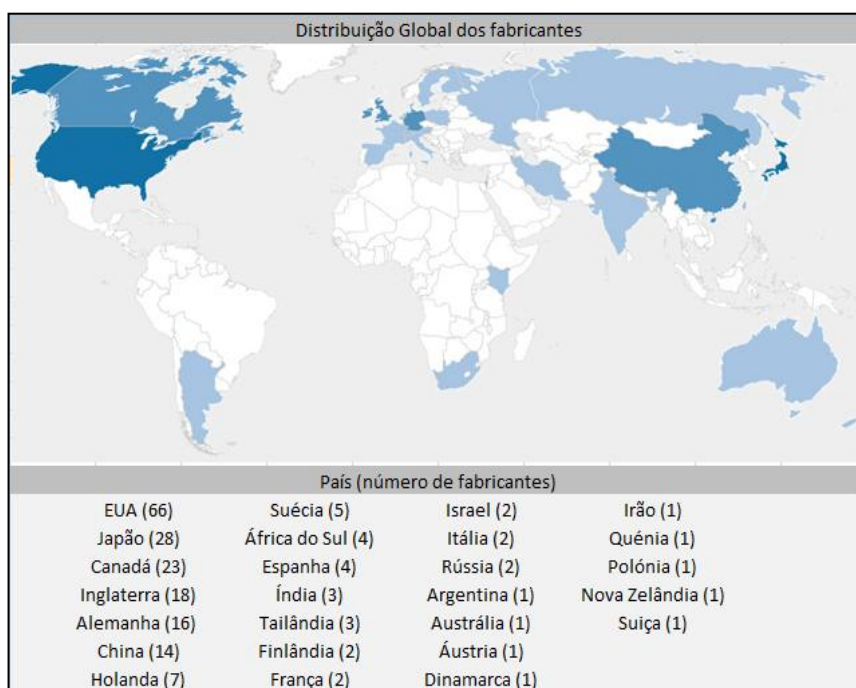
climáticas, atingindo 60% de electricidade produzida proveniente de energias renováveis e o consumo final seja reduzido em 20%. Relativamente à secção eólica, o objectivo é a instalação da potência já atribuída de 2000 MW até 2012 mas com pretensões de se elevar a 8500 MW em 2020. Este crescimento requer a abertura de novos concursos para assim dar cobertura à procura de electricidade proveniente da futura generalização de veículos eléctricos e das tecnologias offshore.

### 2.1.2 - Análise dos produtos de Mercado

Será primeiramente efectuada uma breve análise do mercado mundial de pequenas turbinas eólicas.

#### 2.1.2.1 - Mercado Global

O mapa da figura 2.9 evidencia a distribuição global dos fabricantes de pequenas turbinas, embora não se dediquem exclusivamente a este mercado.



**Figura 2.9 - Distribuição Geral dos Fabricantes [5]**

Como demonstra o mapa anterior, os Estados Unidos da América revelam o maior número de fabricantes a nível mundial, seguido do Japão e Canadá, com números bastante inferiores ao líder. A Europa só aparece em quarto lugar, com a representação da Inglaterra e da Alemanha, muito equivalentes neste campo.

Relativamente às empresas fabricantes de pequenas eólicas de maior destaque em termos de kW vendidos, são referenciadas na tabela 2.5.

**Tabela 2.5** - Empresas a destacar pelo fabrico de pequenas eólicas [5]

Empresa	País	kW vendidos em 2008
Southwest Windpower	EUA	10 000
Proven Energy Ltd.	Inglaterra	4 800
Northern Power	EUA	4 300
Entegrity Wind Systems	Canadá/EUA	3 500
Bergey WindPower Co.	EUA	1 700

Neste prisma, embora os Estados Unidos se destaquem novamente como tendo a empresa líder de mercado no fabrico de pequenas eólicas, a empresa inglesa *Proven Energy* ocupa a segunda posição a nível mundial.

### 2.1.2.2 - Mercado Nacional

Relativamente ao mercado nacional, e dado o estado embrionário em que Portugal se encontra na tecnologia das microturbinas, não há ainda um produtor nacional deste tipo de tecnologia.

É sabido, no entanto, que o INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação - desenvolveu uma microeólica, com uma potência de 2,5 kW. A velocidade para a qual a turbina eólica começa a produzir ( $V_{cut_{in}}$ ) é de 3,5 m/s e a velocidade a partir da qual a turbina se imobiliza ( $V_{cut_{off}}$ ) é de 25 m/s. O diâmetro do rotor é de 2,3 metros. O custo do protótipo ronda os 7500 euros mas com uma perspectiva de redução de até 30% na fase industrial. Numa fase mais evoluída, a perspectiva anual de instalação é de 500 máquinas. Segundo Ana Estanqueiro, investigadora do LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia (antigo INETI), o equipamento poderá ser amortizado em 5 ou 6 anos, sendo que nos restantes 14 ou 15 anos será registado lucro. Apesar da maior facilidade de instalação de equipamentos de energia solar, devido ao estado mais avançado da tecnologia e a maior familiaridade dos instaladores com os mesmos, a energia eólica tem um período de retorno mais rápido. Esta comparação pressupõe a devida instalação do equipamento, em locais cujo potencial seja favorável à mesma.

Neste momento, apesar de não haver ainda um produtor nacional, o mercado português conta com várias empresas de implementação desta tecnologia, de forma a dar resposta à procura de microeólicas. Serão nomeadas apenas algumas das empresas portuguesas com maior relevo na microeólica em Portugal, que fornecem a tecnologia de fabricantes estrangeiros:

- **Autonomia:** Empresa que fornece um micro-aerogerador, baseado num gerador eléctrico com potência nominal de 1kW. Através da conversão da energia cinética do vento, o sistema é capaz de gerar entre 1.500 a 3.000 kWh de energia eléctrica por ano, nas condições meteorológicas típicas do território português. O sistema foi pensado e concebido para ambientes urbanos, assegurando as seguintes características: eficiência na produção de energia, mesmo em situações de vento médio; reduzida dimensão, baixo peso e design apelativo; Silencioso, mesmo com ventos fortes; Seguro, respeitando todas as normas de

segurança; Tempo de vida esperado de 20 anos; Instalação simples, preparado para ligação directa à rede eléctrica. O preço estipulado é de 4000 €.

- **Plurienergia:** Empresa integrada no sector da microgeração, também eólica. Disponibiliza um aerogerador DonQi, um produto holandês, 1,75 kW, desenvolvido para o funcionamento em ambiente urbano. A produção de energia é maximizada pela aceleração do vento a baixas velocidades, o que permite produzir energia a partir de 2,5 m/s, sendo no entanto suficientemente robusto para produzir energia até velocidades de 30 m/s e resistir a ventos de mais de 200 Km/h. É apresentada como muito silenciosa e compacta, comparativamente a outros aerogeradores concorrentes. O preço poderá rondar os 9000€.

- **Energia Lateral:** As turbinas eólicas Energia Lateral, com design específico para ambientes urbanos, possuem dimensão e emissão de ruído aceitáveis sendo portanto extremamente versáteis. A sua implementação é possível quer em espaços urbanos quer em semi-urbanos. A empresa possui vários modelos, tais como: Skystream (2,4 kW), WE S5 (2,5 kW), WE S18 (80 kW), Krauss (1kW, 2,5kW e 5kW).

- **J.A. Revéz & Filhos:** De construção sólida, com duração prevista de pelo menos 20 anos, com uma estrutura simples de aço soldado, o que significa menos avarias e menos manutenção. A empresa possui diferentes modelos: Ampair (100 W, 300 W e 600 W) e RWP FA (1,2 kW).

- **Nextenergy:** Esta empresa tem como objectivo a venda anual de 100 turbinas eólicas para ambiente urbano. O seu custo deverá situar-se entre os 6 mil e os 7 mil euros, com um período de retorno de 3 ou 4 anos. A empresa possui vários produtos tais como: Ropatec (aerogeradores de eixo vertical, suportam regimes turbulentos uma vez que não dependem da velocidade do vento, arrancam automaticamente aos 2 m/s, baixo ruído, multifuncional), BWC XL.1 (potência de 1kW, este produto é indicado para aplicações domésticas de médio consumo ou aplicações rurais onde o fornecimento de electricidade por meios convencionais é complexo e possui baixo custo), BWC Excel (aerogerador para aplicações de médio porte com uma potência nominal de 10 kW). Possui baixos níveis de manutenção, alta confiabilidade e mecanismos de protecção para operação em condições atmosféricas adversas), Bergey WindPower (1kW ou 2kW).

- **Self Energy:** A Self Energy é a primeira ESCO (*Energy Services Company*) portuguesa que baseia o seu modelo no pressuposto de que parte da energia necessária para casa ou empresa pode ser gerada “por si e para si”, utilizando energias renováveis. Assim sendo, esta empresa aposta essencialmente na microgeração. O modelo disponível é Mywind (3,7 kW).

A informação obtida baseou-se nos dados fornecidos pelo portal das energias renováveis e no sítio da internet respectivo de cada empresa ou específico de algumas turbinas [12] [13] [14] [15] [16] [17] [2].



## 2.2 - Descrição da tecnologia

As turbinas eólicas são caracterizadas conforme a potência que estão aptas a fornecer. Uma vez que o principal objectivo é a avaliação das turbinas à pequena escala, será feita uma distinção entre a nomenclatura das pequenas turbinas.

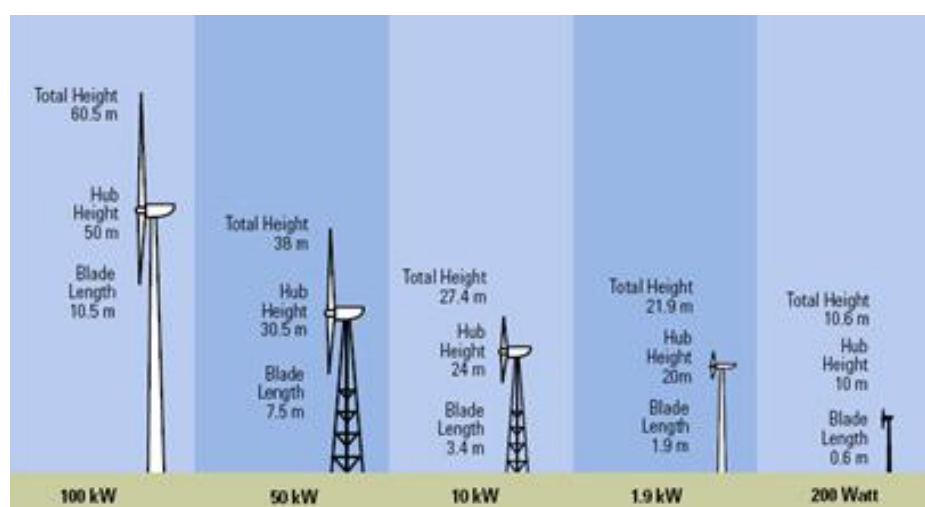
Actualmente, e devido ao carácter recente do tema, não existe ainda uma definição específica relativamente às categorias das pequenas turbinas, sendo vulgarmente chamadas microturbinas, de forma genérica. No entanto, e segundo a descrição pela qual se rege a *European Wind Energy Association* - EWEA, e que será adoptada neste trabalho, as microturbinas são apenas uma das segmentações das pequenas turbinas eólicas. Esta nomenclatura, relativa aos tipos de pequenas turbinas, é apresentada na tabela 2.6.

**Tabela 2.6** - Classificação das pequenas turbinas eólicas [4]

Potência (kW)	área de varrimento do rotor (m <sup>2</sup> )	sub-categoria
$P < 1$	$A < 4,9$	pico turbina eólica
$1 < P < 7$	$A < 40$	micro turbina eólica
$7 < P < 50$	$A < 200$	mini turbina eólica
$50 < P < 100$	$A < 300$	N.A.

Os valores presentes na tabela foram escolhidos especificamente de acordo com a legislação que afecta as pequenas turbinas (IEC-61400) [18]. O valor de 40 m<sup>2</sup> foi o limite estabelecido na primeira edição da legislação referida. O limite de 200 m<sup>2</sup> já foi estabelecido na segunda edição. Finalmente, o limite de 100 kW é definido em vários países como a potência máxima injectável na rede, daí a sua importância na tabela 2.6.

De forma a visualizar e comparar os diferentes tipos de pequenas turbinas, com várias potências e dimensões físicas, é apresentada a figura 2.10.



**Figura 2.10** - Diferentes tipos de pequenas turbinas [18]

Embora a atenção dada às eólicas de grande potência seja bastante superior, as pequenas turbinas têm também os seus trunfos. Do ponto de vista dos consumidores/produtores, há uma contribuição para um futuro sustentável e o combustível é gratuito, não havendo portanto flutuações de preço. Também para a fracção da população que não tem acesso à electricidade (que é bastante considerável principalmente em países em desenvolvimento), pode ver nas pequenas eólicas uma solução para o seu problema. Por outro lado, e uma vez que a distribuição de energia eléctrica provoca perdas nas linhas, a produção local de energia minimiza inevitavelmente estas perdas, o que se traduz numa enorme vantagem a nível financeiro. Estas vantagens contribuem para uma melhor gestão do sistema, aumentando também a fiabilidade do fornecimento de electricidade aos consumidores (maior resistência aos apagões). Também para o país se trata de uma mais-valia uma vez que há assim uma diminuição da dependência energética externa e também se denota o cumprimento de metas a atingir segundo o protocolo de Quioto. Cria ainda oportunidade para a indústria nacional de bens de equipamento e componentes para o sector eléctrico se desenvolver, aumentando assim a oportunidade de emprego e o crescimento económico.

Por outro lado, também como nas eólicas de grande porte, o investimento requerido é considerável, assim como a especificidade do local de implementação do recurso.

## 2.3 - Constituição

Apesar da escassa informação sobre o assunto, conclui-se não existir uma configuração igual para todos os tipos de pequenas turbinas. A figura 2.11 traduz a parte superior de um exemplo de uma pequena turbina eólica.

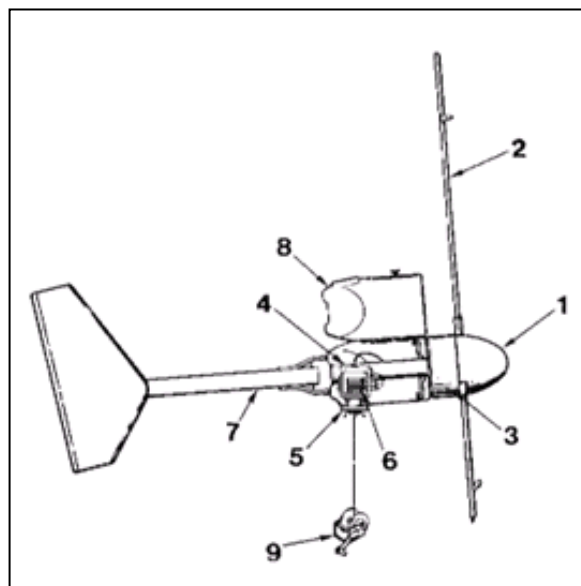


Figura 2.11 - Constituintes da pequena turbina eólica [20]

Relativamente à legenda da figura apresentada, é evidenciada de seguida.

- 1 - Rotor (Cubo)
- 2 - Pá
- 3 - Estator
- 4 - Veio
- 5 - Mecanismo de orientação direcciona
- 6 - Escovas e anéis de rotação
- 7 - Leme
- 8 - Cobertura da cabina
- 9 - Manivela para rodar a turbina em caso de velocidade do vento em excesso

As turbinas eólicas, ou aerogeradores, possuem como elementos principais os seguintes:

### 2.3.1 - Torre

A torre tem como função a elevação da turbina eólica até ventos mais regulares. É um elemento estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. A maioria das torres possui uma forma tubular de modo a minimizar o impacto visual, sendo normalmente construídas em diversos troços de aço ou betão e montadas no local, com o auxílio de equipamentos próprios para o efeito.

### 2.3.2 - Cabina

A cabina, *nacelle*, é o local onde se alojam os constituintes do aerogerador: o gerador, cuja função é converter a energia mecânica em energia eléctrica, o veio secundário, que transfere a energia mecânica da caixa de velocidades (caso exista) para o gerador, a caixa de velocidades, que aumenta o número de rotações do veio secundário, a chumaceira, cuja função é sustentar o veio primário, e finalmente os radiadores, que arrefecem o gerador e a caixa de velocidades.

### 2.3.3 - Rotor

O rotor é o componente do sistema eólico responsável pela captação da energia cinética dos ventos, transformando-a em energia mecânica de rotação. Por esse facto, trata-se do componente mais característico de um sistema eólico, caracterizando-se pela definição das pás que nele são fixadas, pela determinação da sua forma e pelo ângulo de ataque em relação à direcção do vento. A sua configuração irá influenciar o rendimento global do sistema. O conjunto está acoplado, directa ou indirectamente, a um gerador.

O gerador é o componente responsável pela conversão da energia mecânica de rotação em energia eléctrica. Existem fundamentalmente três tipos de aerogeradores com aplicação industrial: as máquinas assíncronas, as máquinas assíncronas duplamente alimentadas e as máquinas síncronas de velocidade variável [21].

Os geradores das turbinas eólicas têm de trabalhar com um rotor que produz um binário bastante irregular devido às oscilações de vento.

A maioria das pequenas turbinas eólicas, assim como a única pequena eólica portuguesa Turban, mencionada mais adiante, são máquinas síncronas. Esta denominação está relacionada com o facto de a máquina operar com velocidade de rotação sincronizada com a frequência. Dentro dos geradores síncronos e de forma a ter velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas, são cada vez mais utilizadas, principalmente em baixas e médias potências, as máquinas síncronas com ímanes permanentes.

Os geradores podem funcionar com velocidade de rotação fixa ou variável. Estas características possuem ambas vantagens e inconvenientes. Para a velocidade fixa é necessária uma caixa de velocidades, contrariamente às máquinas de velocidade variável, que necessitam apenas de um conversor de frequências de forma a injectarem na rede. A Turban possui uma velocidade de rotação variável. As suas principais vantagens são possuir um bom desempenho para baixas velocidades do vento, não consumirem reactiva, terem capacidade de regulação de tensão e flutuações de potência menos acentuadas. Quanto às desvantagens, pode enumerar-se o facto de existirem poucos fabricantes, a menor robustez associada, a rigorosa manutenção, a injeção de harmónicos de alta frequência e o seu custo mais elevado [22].

## 2.4 - Tipos de turbinas

Embora as turbinas eólicas não sejam todas iguais, há uma certa convergência para as turbinas eólicas com um eixo horizontal e três pás. O número de pás de eleição deriva do binómio custo-benefício, uma vez que com mais pás seria possível um melhor rendimento mas envolveria um custo mais elevado e com um número de pás inferior, embora mais barato, tornava-se num sistema menos suave principalmente nas mudanças de direcção do vento, apresentando consequentemente uma vibração indesejada. Os dois grandes tipos de turbinas eólicas existentes são as de rotores de eixo vertical e as de eixo horizontal.

### 2.4.1 - Rotores de eixo horizontal

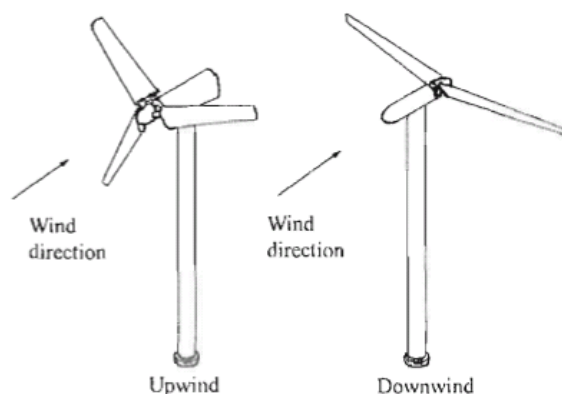
As turbinas eólicas com rotor de eixo horizontal possuem uma eficiência superior às de eixo vertical. No entanto, o tipo horizontal requer sistemas mecânicos mais complexos que o tipo alternativo. Existem turbinas de eixo horizontal com diferentes tipos de pás. No entanto, as turbinas com apenas uma ou duas pás possuem menor estabilidade [23].

A figura 2.12 apresenta uma turbina de eixo horizontal, implementada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



**Figura 2.12** - Turbina com rotor de eixo horizontal

Este tipo de turbinas podem ser classificadas em *upwind* ou *downwind*, conforme a posição do rotor seja na frente ou atrás da turbina, respectivamente. O tipo *upwind* é o mais comum no mercado americano de pequenas turbinas eólicas [24]. A figura 2.13 apresenta as duas configurações, *upwind* e *downwind*.



**Figura 2.13** - Representação de turbinas de eixo horizontal com configurações *upwind* e *downwind* [25]

Nas turbinas *downwind*, como é observável na figura 2.13, o vento, cuja direcção é representada por setas, incide na área de varrimento do rotor por trás da turbina eólica. Este tipo de turbina não necessita de um mecanismo de orientação relativamente ao vento, o que constitui uma vantagem. Por outro lado, o recurso eólico é influenciado negativamente pela torre antes de incidir no rotor, o que justifica a sua reduzida utilização e apenas nas turbinas de pequeno porte, uma vez que nas de maiores dimensões as pás poderiam colidir com a própria torre. Para além deste risco, a turbulência causada provoca ruídos incómodos, principalmente na sua implementação em zonas urbanas.

Relativamente às turbinas *upwind*, a incidência do vento ocorre na parte frontal da turbina, não causando por esse facto turbulência provocada pela torre. Os inconvenientes baseiam-se na passagem das pás pela torre, originando uma carga superior na torre

comparativamente às turbinas *downwind*, e na necessidade de mecanismos de orientação do rotor em relação ao vento.

Outro parâmetro a observar é o sistema de transmissão de energia entre a pequena turbina, que gira 360° conforme o vento, e a torre, que é fixa. É, portanto, necessário um sistema de escovas para que não haja deterioração do cabo eléctrico com o passar do tempo.

### 2.4.2 - Rotores de eixo vertical

A grande vantagem dos rotores de eixo vertical reside no facto de o gerador se encontrar na base, captando assim ventos sem necessidade de um mecanismo de orientação [26]. Outra grande vantagem é a possibilidade de colocação do gerador e da caixa de velocidades (caso exista) no solo, sendo muitas vezes desnecessária uma torre.

Por outro lado, não possuindo uma torre, detectam-se velocidades muito baixas ao nível do solo. Constata-se normalmente a necessidade de utilização de espias de suporte, que aumentam a área de ocupação, para além dos esforços dinâmicos acrescidos, que reduzem a velocidade. Para além disso, este tipo de eixo requer um arranque forçado e em caso de necessidade de manutenção é necessário proceder à desmontagem de toda a turbina. Estas razões justificam o facto de, actualmente, poucas empresas fabricarem turbinas de eixo vertical.

A figura 2.14 apresenta uma turbina de eixo vertical, o protótipo vertical da Turban, a primeira eólica portuguesa. Esta turbina eólica está implementada no edifício *Solar XXI* do LNEG.



Figura 2.14 - Turbina com rotor de eixo vertical

A turbina eólica da figura 2.14 apresenta uma torre, facto que comprova que muitas vezes esta utilização é necessária, de forma a expor a turbina a ventos mais favoráveis e menos turbulentos.

## 2.5 - Característica eléctrica de uma turbina eólica

Uma das características eléctricas mais relevantes de uma turbina eólica é a sua curva de potência. Esta consiste numa curva que apresenta a potência eléctrica produzida pela turbina para diferentes valores da velocidade do vento, sendo projectada para produzir a máxima potência (potência nominal) a uma determinada velocidade do vento (vento nominal).

A figura 2.15 apresenta então a característica eléctrica de uma turbina eólica.

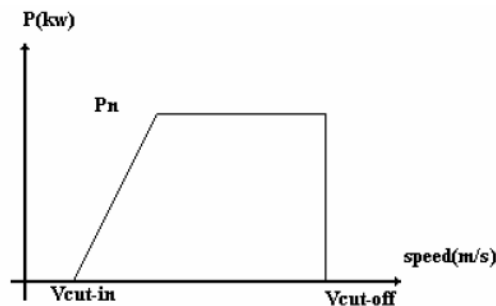


Figura 2.15 - Curva de potência de uma turbina para uma determinada velocidade do vento [21]

Após a observação da figura 2.15 é possível concluir que para velocidades de vento reduzidas, as turbinas eólicas não produzem energia. Apenas após ultrapassarem a velocidade  $V_{cut-in}$ , que de acordo com os modelos comercializados em Portugal e apresentados em 2.1.2, costumam rondar os 2 a 3,5 m/s, é que começa a haver produção de energia. A potência nominal é atingida, variando consoante a turbina, e esta continua a funcionar à potência nominal, ainda que para velocidades mais elevadas. No entanto, quando a turbina alcançar a velocidade  $V_{cut-off}$ , como evidenciado na figura 2.15, que ocorre quando a velocidade do vento ultrapassa os 25 a 30 m/s, o aerogerador é desligado por razões de segurança.

Paul Gipe efectuou um estudo de algumas turbinas eólicas e respectiva relação da eficiência com a velocidade. A figura 2.16 traduz a eficiência devolvida por alguns modelos de pequenas turbinas, entre as quais *Marlec Rutland 910F*, *LVM 6F*, *Southwest Windpower Air 303H* e *Air 403*, *Bergey Windpower 850* e *Ampair 100*.

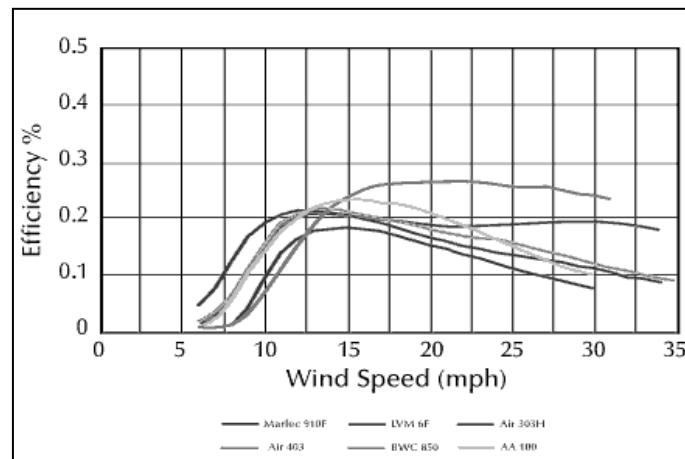


Figura 2.16 - Eficiência de alguns modelos de pequenas turbinas [20]

As turbinas eólicas foram instaladas segundo as especificações dos fabricantes. A maioria das turbinas atinge os 22% de eficiência para a velocidade de 13 milhas por hora, ou seja, 5,8 metros por segundo. A turbina eólica *Air 403* atinge a sua eficiência máxima de 27% a uma velocidade de 20 milhas por hora, ou seja, 8,9 metros por segundo, tratando-se de um valor elevado e pouco comum. Para além das turbinas do fabricante *Southwest Windpower*, as turbinas comuns diminuem novamente a eficiência quando uma determinada velocidade é ultrapassada [20]. Esta característica é comum a todos os tipos de turbina, independentemente do seu tamanho.

## 2.6 - Controlo de potência

A potência compreendida no vento, como será referido no capítulo 3 mais pormenorizadamente, é proporcional ao cubo da velocidade do vento. No entanto, uma vez que velocidades muito elevadas de vento ocorrem com uma frequência relativa muito baixa, contribuindo muito pouco para a energia gerada, não seria economicamente viável projectar aerogeradores para operar eficientemente em tais condições. Se assim fosse, um incremento pouco significativo na energia gerada envolveria custos substanciais nas turbinas eólicas, motivados pelas sobrecargas físicas nas pás e por grandes potências de pico. Estes custos extra podem assim ser evitados se a potência do aerogerador for limitada para ventos fortes.

Embora estas velocidades, como já foi referido, não ocorram muito frequentemente, é evidente a necessidade de limitação de valores de velocidade superiores à velocidade nominal. Esta limitação é efectuada por paragem ou abrandamento do aerogerador. Se assim não fosse, poderia haver estragos catastróficos, tal como a eventual desintegração da turbina eólica.

A regulação pode ser efectuada por meios passivos, desenhando o perfil das pás de forma a que, ultrapassando uma determinada velocidade do vento, estas entrem em perda aerodinâmica, ou por meios activos, variando o passo das pás do rotor. Pode também não ser necessário nenhum tipo de controlo, mas para isso as turbinas têm de garantir que são robustas o suficiente para suportar qualquer tipo de velocidade do vento. Para além disso, as turbinas eólicas devem ser desenhadas para parar imediatamente em caso de falha, como um sobreaquecimento do gerador ou caso a turbina eólica seja desligada da rede (facto que causaria uma rápida aceleração das pás).

Teoricamente é possível efectuar o controlo de potência desviando a turbina da direcção do vento, por intermédio do mecanismo de orientação direcciona. Embora este processo não seja viável para as turbinas eólicas de dimensões consideráveis, uma vez que este origina cargas aerodinâmicas muito elevadas originando problemas de fadiga, este é praticado nas turbinas de pequenas dimensões.

A geometria das pás do rotor, cuja secção recta tem a forma de um perfil alar, determina a quantidade de energia que é extraída para cada velocidade do vento.

Devido a tratar-se de um tema que para além de recente envolve muitos custos, como a criação de patentes relativamente aos equipamentos, a escassa informação existente é por



vezes um pouco contraditória. Serão apresentados, no entanto, os sistemas utilizados para o controlo das pequenas turbinas eólicas segundo [27]:

### 2.6.1 - Controlo por variação do passo

O tipo de controlo em questão permite a rotação de toda a pá em torno do seu eixo longitudinal, daí a sua nomenclatura de variação do passo das pás. A figura 2.17 apresenta um esquema com o ângulo das pás,  $\beta$ .

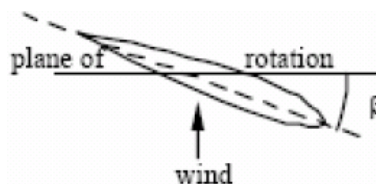


Figura 2.17 - Esquema de uma pá e respectivo ângulo de passo [21]

O sistema de controlo vai variando o passo da pá até que seja atingida a velocidade nominal, à qual a turbina fornece a potência nominal. Desta forma, a componente da força que contribui para o binário é sempre maximizada. No caso de a velocidade estar a exceder a velocidade nominal, é introduzida uma adequada inclinação na pá para que desta forma o binário produzido diminua e corresponda à potência nominal. Este tipo de controlo é normalmente efectuado por sistemas hidráulicos. No que toca à extensão da pá, a execução não é ainda consensual uma vez que há fabricantes que aplicam o controlo em toda a pá, aproveitando assim uma maior área, e outros em que o controlo é apenas efectuado na ponta da pá, com a vantagem de robustecer a pá.

As principais vantagens da variação por passo são o eficaz controlo da potência para qualquer gama de velocidade do vento, a redução dos esforços de fadiga devido à possibilidade de variação do ângulo de passo, e por conseguinte a redução da superfície frontal relativamente ao vento, e a suavização do arranque e da travagem devido ao possível embalamamento do rotor até à velocidade pretendida.

No entanto, como já foi referido, esta solução é mais dispendiosa devido ao aumento da sua complexidade.

### 2.6.2 - Controlo por perda aerodinâmica

Este tipo de controlo possui duas variantes: a passiva e a activa.

#### 2.6.2.1 - Controlo passivo

As turbinas que utilizam este controlo possuem as pás fixas, ou seja, não rodam em torno de um eixo longitudinal. As características aerodinâmicas das pás do rotor constituem a estratégia deste tipo de controlo, desenhado para assegurar que, ultrapassada uma determinada velocidade do vento, seja criada turbulência na face da pá oposta à que enfrenta o vento.

Uma vez que as pás estão colocadas a um determinado ângulo de passo fixo, à medida que a velocidade do vento aumenta, também aumenta o ângulo de ataque do vento. Quando este ultrapassa um certo valor, a componente de sustentação diminui, e as forças de arrastamento passam a ser dominantes: a pá entrou assim em perda de sustentação. Observando atentamente um rotor com um controlo deste tipo, é possível denotar uma ligeira torção ao longo do eixo longitudinal da pá, de forma a garantir que a perda aerodinâmica é efectuada gradualmente.

A principal vantagem deste tipo de controlo é a sua simplicidade devido à menor quantidade de constituintes em movimento o que também contribui, evidentemente, para o seu menor custo. Por outro lado, a sua implementação requer exigentes métodos de cálculo, de forma a definir o ângulo de ataque para o qual a pá entra em perda aerodinâmica, para além de que no arranque, com baixas velocidades, este tipo de turbina não tem binário suficiente.

#### **2.6.2.1 - Controlo activo**

Este tipo de controlo é mais vocacionado para as turbinas eólicas de grande porte. Este tipo de controlo tem semelhanças com o controlo por variação de passo, apresentado anteriormente, uma vez que possuem pás que permitem este controlo. De forma a possuir um binário superior no arranque relativamente ao passivo, as pás são controladas para velocidades muito baixas.

Uma das vantagens deste tipo relativamente ao passivo é o controlo mais preciso da potência, evitando assim a ultrapassagem da potência nominal no início de uma rajada de vento. Outra vantagem é a possibilidade da turbina trabalhar à potência nominal para as velocidades do vento mais elevadas, contrariamente ao passivo, no qual se verifica uma queda de produção para grandes velocidades do vento.

A grande diferença entre este tipo de controlo e o controlo por variação de passo é que se o gerador estiver a atingir o limite, a máquina activa o ângulo de passo em direcções opostas. Neste caso, será aumentado o ângulo de ataque de forma a perder o excesso de energia eólica [27].

#### **2.6.3 - Controlo por orientação direccional (yaw)**

Um outro tipo de controlo envolve o desvio relativamente à direcção do vento, quando este é mais forte. Este tipo de controlo pode ser efectuada de forma passiva ou activa. A forma activa, utilizada vulgarmente nas turbinas eólicas de grande escala, envolve a presença de um anemómetro que meça a velocidade do vento e que a partir de certo valor indique ao controlador que é necessário efectuar um desvio. A forma passiva, utilizada na maioria dos casos das pequenas turbinas eólicas, envolve o desvio da turbina, com a ajuda do leme, colocando-se esta de perfil para a direcção dominante do vento.

Como já foi referido, este tipo de controlo não é aplicado nas turbinas eólicas de grande dimensão uma vez que acarreta problemas de fadiga, que podem danificar o equipamento.

### 2.6.4 - Controlo por inclinação das pás (*blade bending*)

Diversas pequenas turbinas eólicas, para a constatação de velocidades de vento mais elevadas, permitem que as suas pás se inclinem ou tombem para que seja reduzida a área de varrimento do rotor e consequentemente a resistência ao vento [28].

## 2.7 - Tipos de sistemas e suas aplicações

As pequenas turbinas eólicas são aplicadas em dois grandes grupos: sistemas ligados à rede e sistemas isolados.

### 2.7.1 - Sistemas ligados à rede

No tipo ligado à rede, há uma geração distribuída em que pequenos geradores eléctricos são ligados à rede de distribuição e controlados por um operador. Cada sistema tem a fonte renovável, neste caso o aerogerador, um inversor e um contador. A figura 2.18 representa o esquema de um sistema ligado à rede eléctrica.

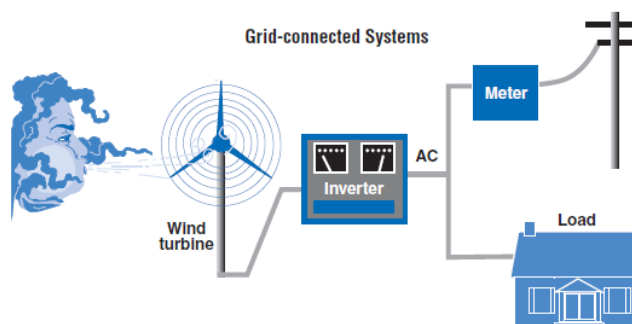


Figura 2.18 - Sistema ligado à rede [5]

A energia produzida pela fonte renovável, no caso da figura 2.18, é em corrente contínua. No entanto, uma vez que a carga (representada pela casa na figura 2.18) e a rede eléctrica são alimentadas a corrente alternada, é necessário um inversor (também representado na figura) para fazer a referida conversão. A casa é então alimentada pela fonte renovável e a energia excedente é vendida à rede eléctrica, ou então, conforme a lei vigente neste momento em Portugal, toda a energia é vendida à rede e é posteriormente comprada conforme necessário. Existe assim uma relação de simbiose com a rede, uma vez que mesmo não havendo vento suficiente para suprir as necessidades da carga, é sempre a rede quem efectua o fornecimento. Dado que a rede funciona como uma “bateria de armazenamento”, no caso de haver uma interrupção na rede, também haverá uma interrupção em casa, mesmo que exista vento. Este fenómeno deve-se às características dos inversores [29].

Embora não seja muito usual, principalmente em Portugal devido à lei implementada, no caso de se pretender ter um sistema de segurança para proteger, por exemplo, a casa ou o escritório, e que actue na ocorrência de uma falha de rede, é necessário um banco de baterias. Nestes sistemas, o gerador eólico ou mesmo a rede fornece normalmente a casa e o

excesso de energia é armazenado nas baterias. Quando estas se encontrarem carregadas, o excesso é enviado para a rede. Caso ocorra então uma falha de abastecimento, quer do aerogerador quer da rede, as baterias fornecerão a energia.

Embora vulgarmente se associe as pequenas turbinas a sistemas isolados, existe um enorme potencial nos pequenos sistemas ligados à rede. A concentração da população nas áreas residenciais provoca a procura de electricidade. Assim, se a produção for individual ou pelo menos mais distribuída, reduz a procura de electricidade. Para tal, alguns países, como Portugal, apostam nesta produção dispersa, criando incentivos para que as pessoas implementem estes pequenos sistemas, quer a nível residencial que a nível industrial.

### 2.7.2 - Sistemas isolados da rede

Quanto ao tipo isolado, trata-se de sistemas autónomos, como o próprio nome indica. Têm portanto a responsabilidade de controlar a tensão e a frequência. A figura 2.19 apresenta o esquema de implementação de um sistema isolado.

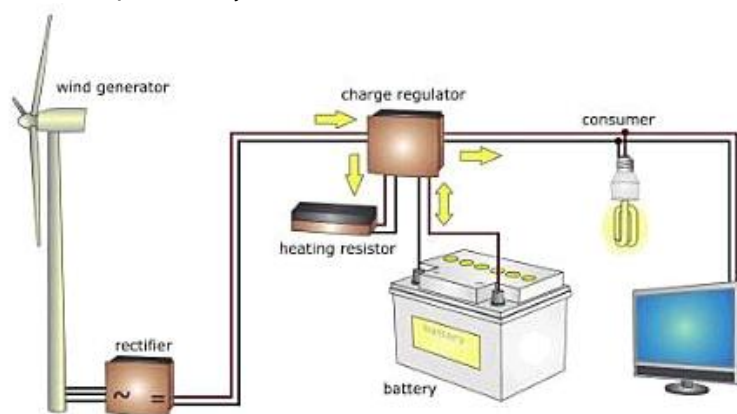


Figura 2.19 - Esquema de implementação de um sistema isolado [30]

Na figura 2.19, contrariamente à figura 2.18 de um sistema ligado à rede, está representado um gerador de corrente alternada, tal como se verifica na maioria dos sistemas. No sistema isolado, para além de um rectificador (necessário à bateria, que é carregada com corrente contínua) e um regulador de carga, são necessárias baterias para armazenar a energia produzida, normalmente dimensionadas para dois ou três dias de actuação em caso de falha. Nestes sistemas, os excedentes não poderão ser enviados para a rede nem esta recorrer-lhes em caso de falta de energia. Esta é a razão pela a qual as baterias têm de ter maior capacidade que as referenciadas em 2.7.1, para o caso de sistemas ligados à rede com recurso a baterias.

A bateria é um dispositivo constituído por células electroquímicas que convertem energia química em energia eléctrica, sob a forma de corrente contínua, quando estão no processo de descarga, e energia eléctrica em energia química quando em carga, ou seja, possuem a funcionalidade de armazenar a energia eólica-eléctrica excedente sob a forma de energia química. Durante o processo de carga e descarga, as baterias perdem energia sob a forma de calor, devido às reacções químicas internas, pelo que apresentam um rendimento inferior a 100%. Portanto, para a implementação deste tipo de sistemas, é necessário manter as

baterias a uma determinada temperatura de operação e num local ventilado, garantir que a carga e a descarga são bem executadas e garantir a segurança dos componentes que a constituem.

No entanto, é de salientar que o armazenamento da energia conduz a perdas, não sendo por isso uma opção eficiente para a gestão da energia eólica. Se um país não tem condições geográficas favoráveis ao aproveitamento hidroeléctrico, o armazenamento não é uma solução atraente devido ao custo da penetração moderada da energia eólica.

Por outro lado, quando uma bateria se encontra totalmente carregada, o sistema eólico não funciona tão simplesmente como o fotovoltaico, para o qual basta que o regulador de carga remova o painel fotovoltaico prevenindo assim o demasiado carregamento de uma bateria, *overcharging*. Quanto ao sistema eólico, se por um lado não tiver uma bateria acoplada, ventos mais fortes podem provocar rotações de tal ordem que podem causar danos no gerador. Portanto, alguns reguladores de carga comutam os geradores com a bateria carregada para uma resistência (representada por *heating resistor* na figura 2.19), reduzindo assim o número de rotações [30].

Este tipo de sistema isolado da rede induz a combinação das pequenas eólicas com outras fontes de energia renováveis, de forma a tornar os sistemas mais fiáveis. O aumento dos combustíveis tornou a conjugação da energia eólica com a solar ainda mais atractiva devido à sua complementaridade, uma vez que quando há fraco recurso solar, o vento costuma ser mais forte, favorável ao recurso eólico, e vice-versa [30]. Devido à ocorrência dos picos de produção dos recursos eólico e solar serem em diferentes períodos do dia e do ano, os sistemas híbridos são mais eficientes na produção de energia, correspondendo às necessidades dos consumidores [5].

Um outro tipo híbrido é o sistema eólico-diesel, também ele com capacidade de armazenamento. Este sistema, embora eficiente, não é tão atractivo uma vez que um dos recursos intervenientes não é renovável.

A figura 2.20 apresenta o esquema de um sistema híbrido, com a conjugação dos recursos eólico, solar e diesel.

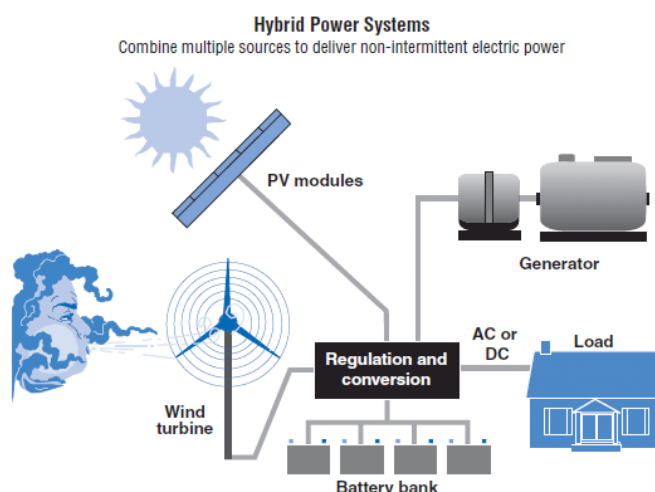


Figura 2.20- Esquema de implementação de um sistema híbrido [5]

Para momentos em que nem a turbina eólica nem o painel solar estão a produzir, a maioria dos sistemas híbridos recorre a baterias a não ser que possua também um gerador a diesel, como o da figura 2.20. Caso as baterias não consigam responder às necessidades, o gerador a diesel pode recarregá-las. O sistema fica assim mais complexo mas actualmente já existem controladores electrónicos para operar estes sistemas automaticamente. Apesar dos inconvenientes, devido à associação de uma energia não renovável, a presença deste tipo de geradores pode reduzir o tamanho de alguns componentes do sistema, para além de aumentar a sua fiabilidade.

As tempestades provocam, geralmente, uma ameaça às turbinas eólicas. As turbinas eólicas de grande escala possuem dispositivos de protecção contra as intempéries. No entanto, por razões económicas, as pequenas turbinas não têm normalmente estes dispositivos de protecção pelo que é prudente desactivá-las em caso de previsão de ameaças meteorológicas.

### 2.7.3 - Aplicações das pequenas turbinas eólicas

Relativamente às aplicações dos dois tipos de sistemas, isolado e ligado à rede, existem várias combinações possíveis para cada uma, relativamente quer aos locais de implementação quer ao tamanho das turbinas e quer ao tipo de sistema. A tabela 2.7 demonstra o leque de opções referido.

Tabela 2.7 - Aplicações das turbinas [4]

Rated power/system					Wind-diesel								Wind mini-farm				
			Wind hybrid							Single wind turbine							
	Wind home system									Build integrated							
P < 1kW	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X				
1kW < P < 7 kW	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X
7 kW < P < 50 kW					X	X	X	X	X				X	X	X	X	X
50 kW < P < 100 kW								X	X						X	X	X
Small wind systems applications	Sailboats	Signalling	Street lamp	Remote houses/ dwellings	Farms	Water pumping	Seawater desalination	Village power	Mini-grid	Street lamp	Buildings rooftop	Dwellings	Public centres	Car parking	Industrial	Industrial	Farms
	Off-grid applications									On-grid applications							

Para além da classificação de sistema isolado e ligado à rede, referido anteriormente, existe ainda uma subclassificação. Assim, e para o caso das turbinas isoladas (desligadas da rede) existem três tipos: sistemas eólicos de pequena dimensão para aplicações doméstica ou móvel - *wind home system* (caravanas, barcos, etc.), sistemas híbridos - *wind hybrid* - e sistemas eólicos-diesel - *wind-diesel*. Na tabela 2.7, os sistemas híbridos referem-se a sistemas que incluem o recurso eólico e um outro recurso (geralmente solar). Os geradores a diesel podem surgir nesta secção mas apenas como elemento a recorrer em caso de falha,

vulgarmente chamado *back-up*. Na tabela 2.7, os sistemas eólicos-diesel referem-se a sistemas onde o gerador a diesel tem um papel fulcral, não apenas em caso de falha de outra fonte mas sim como um componente essencial de controlo e funcionamento do sistema. Esta configuração tem uma utilização mais considerável em aplicações isoladas de maiores dimensões. O seu sistema de reserva (se o tiver) é reduzido, e apenas com o intuito de controlo, uma vez que a sua fiabilidade é bastante elevada.

No caso de sistemas ligados à rede, estes também podem ser divididos e a escolha passa por questões logísticas (relativas ao espaço de implementação) e económicas. A integração na rede de pequenas turbinas eólicas tem aplicação residencial, industrial e mais recentemente urbana. A integração de turbinas em edifícios e a quantidade de turbinas que serão implementadas são as questões fundamentais dos sistemas integrados na rede.





## Capítulo 3

### Avaliação do recurso eólico

O vento é definido essencialmente por dois parâmetros: velocidade e direcção. Uma vez que a sua intensidade não é regular e a sua disponibilidade depende do local, é necessário que medições de parâmetros de vento assim como um estudo do relevo do local precedam cada instalação.

#### **3.1 - Factores que condicionam o aproveitamento do potencial eólico**

Dados climáticos e dados do terreno e respectiva utilização são exemplos de informação essencial para a análise de potencial eólico. Através de mapas analógicos, mapas digitais, imagens aéreas e de satélite, ou mesmo estudos de campo, é possível constatar a diversidade de factores que influenciam o regime de ventos. O recurso eólico é então influenciado por características topográficas, rugosidade do solo e altura.

##### **3.1.1 - Altura**

Os valores das medições da velocidade e direcção do vento são requisitos essenciais para a caracterização do escoamento atmosférico de um determinado local. Estas medições são efectuadas por um período mínimo de um ano, em locais abrangentes onde se pretendem instalar os parques eólicos, e a uma altura tão próxima quanto possível do rotor da turbina a instalar.

Se, no entanto, surgir a necessidade de transpor verticalmente os valores da velocidade do vento, recorre-se às Leis de Potência ou Logarítmica, utilizadas em regiões homogéneas e superfícies planas. Ambas as Leis possuem uma incerteza, uma vez que estão sujeitas às condições variáveis e complexas do fluxo de vento.

A primeira abordagem, a Lei de Potência, embora não possua uma elevada precisão, é um modelo bastante simples, daí a sua grande aplicação por investigadores do sector eólico [25].

Segue-se então a expressão da Lei da Potência, na equação 3.1.

$$V_Z = V_{Z_{ref}} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^n \quad (3.1)$$

$V_Z$  = velocidade na altura desejada

$V_{Z_{ref}}$  = velocidade na altura de referência

$Z$  = altura desejada

$Z_{ref}$  = altura de referência

$n$  = parâmetro associado à rugosidade da superfície

A tabela seguinte, figura 3.1, apresenta vários valores de  $n$  para diferentes terrenos:

**Tabela 3.1** - Variação do factor  $n$  para diferentes tipos de superfície [31]

Descrição do terreno	Factor $n$
Superfície lisa, lago ou oceano	0,1
Gramma baixa	0,14
Vegatação rasteira (até 0,3 m), árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,2
Árvores, construções ocasionais	0,22 - 0,24
Áreas residenciais	0,28 - 0,40

Relativamente à *Lei Logarítmica*, trata-se de um modelo de maior complexidade, que considera o escoamento na atmosfera muito turbulento.

A utilização deste modelo baseia-se também na estimação da velocidade do vento numa determinada altura sabendo uma altura de referência.

A *Lei Logarítmica* é expressa da seguinte forma:

$$V_Z = V_{Z_{ref}} \frac{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right)} \quad (3.2)$$

$V_Z$  = velocidade na altura desejada

$V_{Z_{ref}}$  = velocidade na altura de referência

$Z$  = altura desejada

$Z_{ref}$  = altura de referência

$Z_0$  = comprimento de rugosidade do local

A introdução de um factor  $Z_0$  assume que a superfície da Terra nunca é totalmente lisa, pelo que este factor é denominado comprimento da rugosidade e se exprime em metros.

A tabela seguinte, tabela 3.2, evidencia os valores que o factor  $Z_0$  pode tomar.

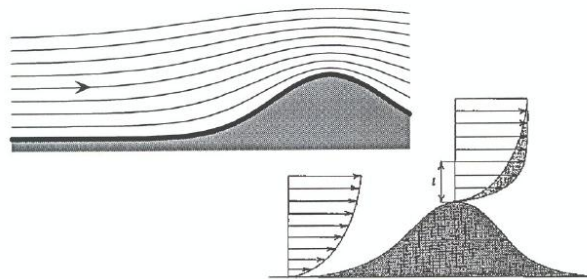
**Tabela 3.2** - Variação do factor  $Z_0$  para diferentes tipos de superfície [31]

Tipo de terreno	$Z_0$ (m)
Plano (mar, areia, neve)	0,001 - 0,02
Moderadamente rugoso (ervas curtas, campos de trigo ou cereais)	0,02 - 0,3
Rugoso (bosques, bairros)	0,3 - 2
Muito rugoso (cidades, edifícios)	2, 10

### 3.1.2 - Orografia local

O relevo influencia decisivamente a velocidade do vento, tanto em direcção como em intensidade. Dependendo da geometria do local, é possível constatar um aumento na velocidade do vento e uma considerável mudança de direcção.

Através da observação da figura 3.1 é possível concluir que se verificam precisamente as alterações referidas. As trajectórias mais elevadas representam maiores velocidades.

**Figura 3.1** - Influência do relevo no recurso eólico [31]

De forma a descrever o relevo de uma região são frequentemente utilizados mapas topográficos e por sua vez curvas de nível.

### 3.1.3 - Obstáculos e rugosidade

Os obstáculos são elementos de dimensões conhecidas, tais como formações rochosas, construções civis ou agrupamento denso de árvores, que podem afectar o comportamento do vento uma vez que para além de obstruírem o movimento das partículas de ar, modificam a distribuição de velocidades. Considerando os obstáculos feitos pelo Homem e não os naturais, é comum atribuir-lhes, para efeito de estudo, a forma de um bloco rectangular e o vento ser bidimensional. Esta representação é exposta na figura 3.2, onde o fluxo de vento é notoriamente alterado devido ao obstáculo.

**Figura 3.2** - Esquema da influência de um obstáculo no fluxo do vento [25]

Analisando a figura 3.2, o vento divide-se ao embater na superfície do obstáculo. Parte do fluxo de vento não o ultrapassa, formando uma esteira a montante do edifício. O vento que consegue ultrapassar o obstáculo forma também uma esteira a jusante do edifício, ainda mais evidente do que a montante deste.

A representação evidenciada na figura 3.2 é uma simulação simplificada da influência de um objecto, uma vez que existem vários factores que influenciam o comportamento eólico tais como a forma dos obstáculos, a distância entre eles e a turbina e a sua porosidade.

Relativamente à forma dos obstáculos, é necessário atender quer à altura quer a largura. Quanto mais alto é um edifício, maior é a sua sombra ou esteira por este provocada. Para o caso de a altura do obstáculo ser superior a mais de metade da altura do mastro da turbina eólica, implementada em torre, os resultados são um pouco incertos, uma vez que a exacta geometria do obstáculo, como por exemplo a diferença de ter telhado ou não, afectará o resultado. Esta constatação já remete também para a largura, uma vez que um objecto mais estreito causará uma menor esteira do que um objecto com largura superior [27].

A distância entre os obstáculos e a turbina eólica é muito importante para o efeito de abrigo (*shelter effect*) pois este diminui com o afastamento do objecto, como é perceptível pela observação da figura 3.2.

A influência na diminuição da velocidade do vento depende também da porosidade, caracterizada pela área aberta dividida pela área total do objecto. No caso de um edifício, obviamente sólido, a porosidade é inexistente, contrastando com o caso de uma árvore, na qual a porosidade é muito superior. No Inverno, altura em que não possui folhas, mais de metade do escoamento do vento atravessa as árvores. Já no Verão, a folhagem é mais densa, pelo que a porosidade será cerca de um terço [27].

Os obstáculos, integrados nos factores que influenciam o comportamento eólico, serão aprofundados mais adiante em 3.6, no subcapítulo referente ao ambiente urbano.

As zonas geográficas acidentadas estão associadas a um obstáculo ou a um conjunto de obstáculos que irá constituir a rugosidade do terreno. Estes termos são exclusivos, ou seja, se um elemento é considerado obstáculo não poderá incluir-se na rugosidade, e vice-versa.

A rugosidade representa uma área mais vasta e abrangente e quanto mais densa for a sua formação maior será a rugosidade e consequentemente maior dificuldade terá o vento em se deslocar. Já anteriormente, em 3.1.1, quer na *Lei de Potência* quer na *Lei Logarítmica* foi frisada a importância das características do terreno e da rugosidade. Estas estão portanto directamente relacionadas com o desempenho do vento.

### 3.2 - Representação estatística da velocidade do vento

O aproveitamento eólico com fins energéticos é uma finalidade muito exigente devido ao rigor necessário à sua caracterização.

De forma a caracterizar o recurso eólico, e uma vez que a intensidade do vento ao longo do dia não é constante, é importante poder dispor de uma forma de caracterizar a distribuição das velocidades do vento ao longo de um ano. Desta forma é necessário recorrer a um tratamento de dados estatístico de forma a agrupar as velocidades e o número das suas

ocorrências e posteriormente determinar a probabilidade de ocorrência de ventos com certa velocidade. A figura 3.3 apresenta a distribuição de frequência da velocidade do vento.

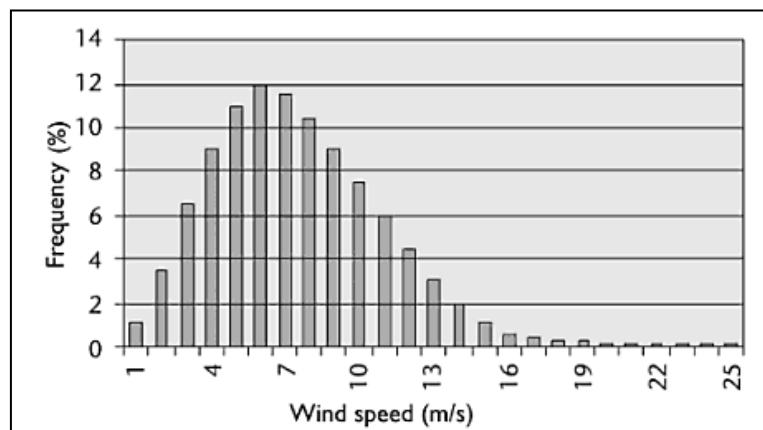


Figura 3.3 - Distribuição de frequência da velocidade do vento [32]

Através de verificações experimentais concluiu-se que a velocidade do vento segue uma curva de densidade de probabilidade semelhante às distribuições de Weibull e Rayleigh. A vantagem é que as propriedades das curvas de distribuição de probabilidade conhecidas podem ser deduzidas matematicamente.

### 3.2.1 - Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos, sendo também usado na maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia.

A figura 3.4 apresenta a curva de distribuição de Weibull, idêntica, de facto, à figura anterior.

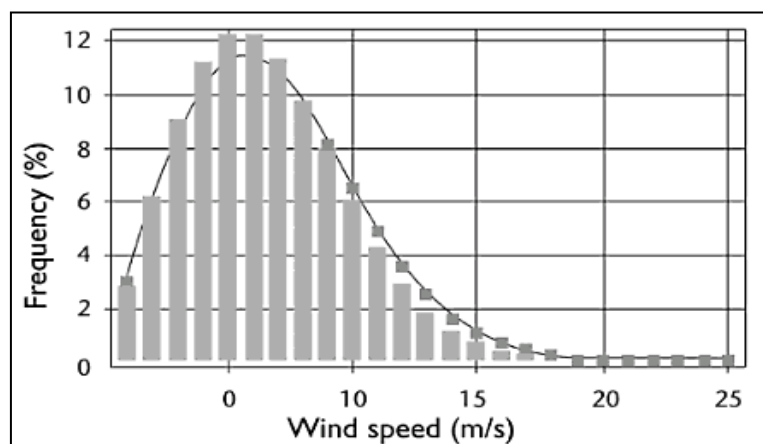


Figura 3.4 - Curva de distribuição de Weibull [32]

A seguinte equação, 3.3, representa a probabilidade de se registar uma determinada velocidade durante o ano.

$$g(V) = \frac{k}{A} \times \left(\frac{V}{A}\right)^{(k-1)} \times e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k} \quad (3.3)$$

$k$  = factor de forma (adimensional)

$A$  = factor de escala (m/s)

$V$  = velocidade (m/s)

É introduzido um factor de forma,  $k$ , que é adimensional e proporciona informação sobre a uniformidade da distribuição e a forma da curva, e um factor de escala,  $A$ , relacionado com o valor da velocidade média.

Utilizando a curva de potência de uma turbina eólica pode estimar-se a energia produzida pela mesma num determinado local. O cálculo da estimativa anual de produção de energia num local é feita através da integração do produto da função de distribuição do vento,  $g(V)$ , pela curva de potência de uma turbina,  $P(V)$ , como apresenta (3.4)

$$P = \int_0^{\infty} g(V) \cdot P(V) dV \quad (3.4)$$

Substituindo na equação da distribuição de Weibull, tem-se que:

$$P = \int_0^{\infty} \frac{k}{A} \times \left(\frac{V}{A}\right)^{(k-1)} \times e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k} \times P(V) dV \quad (3.5)$$

Uma vez normalizado o perfil do vento, de acordo com a distribuição de Weibull, é possível obter a potência que se pode esperar de um sistema.

### 3.2.2 - Distribuição de Rayleigh

Uma distribuição análoga na descrição do perfil eólico é a distribuição de Rayleigh, um caso particular da distribuição de Weibull, com parâmetro de forma,  $k$ , igual a 2 e apenas com um parâmetro de ajuste.

Esta distribuição, embora de simples aplicação, possui algumas limitações como, nomeadamente, na representação de velocidades mais elevadas.

## 3.3 - Energia produzida

A energia anual produzida é o factor técnico-económico mais importante na avaliação de um projecto eólico. Uma avaliação imprecisa aumentará o risco de investimento e poderá

estar relacionada com incertezas da média anual da distribuição da velocidade do vento ao longo do tempo e na curva de potência da turbina eólica.

Para calcular a energia gerada por um sistema eólico é necessário conhecer os elementos que definem o regime de ventos local, ou seja, o histograma de velocidades do vento obtido a partir de medições locais ou estimado a partir de curvas de distribuição de frequência e curvas de potência da turbina eólica.

Para se determinar a energia gerada é necessário calcular a potência disponível,  $Pd$ .

A potência disponível transportada pelo vento é dada por:

$$Pd = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (3.6)$$

$Pd$  = potência disponível (W);

$\rho$  = densidade do ar ( $1,225 \text{ Kg/m}^3$ );

$A$  = área de varrimento ( $\text{m}^2$ );

$v$  = velocidade do vento (m/s).

A potência gerada pela turbina eólica é dada por:

$$Pg = Pd \times \eta \quad (3.7)$$

$\eta$  = rendimento total do sistema

$Pg$  = Potência gerada

$Pd$  = potência disponível

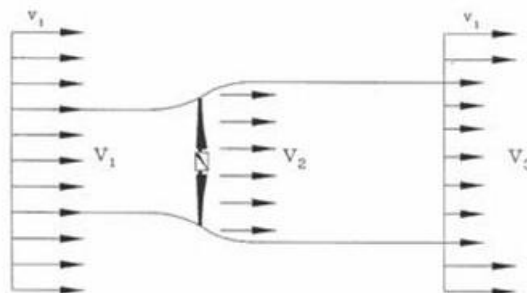
A velocidade é directamente proporcional à distância ao solo e seriamente afectada pelo relevo do local, como já foi referido. Desta forma, os parâmetros referidos intervêm de forma decisiva no cálculo da potência e, por sua vez, na análise do potencial eólico de um local.

Uma turbina eólica não permite converter toda a energia do vento em energia útil pois dessa forma anular-se-ia o transporte de energia aquando da passagem do vento por uma turbina eólica. O cientista alemão Albert Betz demonstrou matematicamente que o óptimo é atingido quando o rotor reduz em um terço a velocidade do vento e que a potência recuperável por uma turbina eólica tem um limite teórico máximo, traduzido pelo coeficiente de *Betz* (igual a 0,593). A potência eólica é descrita por:

$$Pd = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times Cp \quad (3.8)$$

$Cp$  = Coeficiente de Betz

Albert Betz considerou um conjunto de pás num tubo onde  $v_1$  representa a velocidade do vento antes de alcançar as pás,  $v_2$  a velocidade do vento imediatamente após as pás e  $v_3$  a velocidade após o distúrbio causado pelas pás. Este procedimento é apresentado na figura 3.5.



**Figura 3.5** - Perdas na velocidade do vento aquando da passagem deste por pás [33]

Assim como é representado na figura 3.5, o deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma determinada velocidade  $v_1$  é atrasado pelas pás de uma hipotética turbina, transformando-se na velocidade  $v_2$  após a passagem por estas. A perda evidenciada nesta descrição descreve então o coeficiente de Betz, ou seja, nem toda a energia será convertida.

Relativamente às turbinas de pequena dimensão, foram efectuadas medições no Texas, na estação experimental do Departamento da Agricultura, de uma turbina *Bergey 1500*, cuja conversão máxima de energia do vento para electricidade era de 23 % [20].

No entanto, esta conversão de energia depende do vento a que as pequenas turbinas estão expostas. A potência produzida por um aerogerador varia com a velocidade do vento segundo a curva de potência desse mesmo aerogerador e a energia produzida será o integral da potência produzida durante o tempo que estiver em funcionamento.

Apenas um reduzido número de turbinas têm uma boa prestação em sítios bastante ventosos. A tabela 3.3 apresenta a preferência das pequenas turbinas por locais menos ventosos, resultando numa energia obtida mais elevada. Os valores apresentados traduzem a relação entre a velocidade constatada e a respectiva energia extraída.

**Tabela 3.3** - Energia anual estimada para pequenas turbinas eólicas [20]

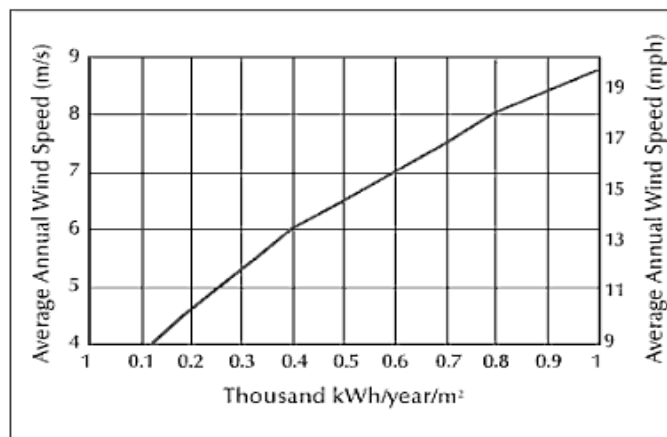
Velocidade média anual (m/s)	Eficiência (%)	Energia anual (kWh/m <sup>2</sup> )
4	0,2	130
5	0,2	260
6	0,19	410
7	0,16	570
8	0,15	770
9	0,14	1020

Através da observação da tabela 3.3, é possível concluir que as pequenas turbinas são mais eficazes para menores velocidades, normalmente junto das habitações e com velocidades do vento ideais de 4 e 5 metros por segundo. É também possível verificar que para velocidades elevadas como 9 metros por segundo, a eficiência decresce para 14 %. Este resultado era esperado devido à relação cúbica entre a potência e a velocidade do vento, uma vez que para um aumento da velocidade, ainda que não muito considerável, a potência aumenta notavelmente, tendo a pequena turbina capacidade de apenas aproveitar uma parte desta energia. Esta constatação depende obviamente da potência da turbina eólica a instalar.



A figura 3.6 apresenta a relação entre a velocidade média anual do vento e a energia gerada anualmente por metro quadrado por uma pequena turbina eólica.

A densidade de potência eólica é útil para avaliar o recurso eólico disponível num local com suposto potencial. Esta variável é medida em  $\text{W/m}^2$  e indica a quantidade de energia disponível num local por área de varrimento do rotor.



**Figura 3.6** - Relação entre a velocidade média anual do vento (m/s) e a energia anual por m² (x1000 kWh/ano/m²) [20]

Este gráfico foi construído com base em fundamentos teóricos mas também em medições efectuadas em quatro pequenas turbinas no *Wulf test Field*, num estudo protagonizado por Paul Gipe em 2004 [20].

A utilidade deste gráfico é evidente, pois uma vez conhecida a velocidade do vento que em média é constatada num determinado local, facilmente se deduz a energia que o sistema poderá fornecer. Embora esta energia dependa também do tipo de turbina, o resultado obtido traduz um valor que se lhe assemelhará.

De forma a quantificar a energia pretendida e avaliar a viabilidade de implementação de turbinas eólicas, são utilizados indicadores de produção energética. Dividindo a produção (energia anual) pela potência nominal do aerogerador instalado ou que se pretende instalar, obtém-se o número de horas de funcionamento do equipamento à potência nominal, por ano. Este índice, denominado NEPs, é medido em horas por ano (h/ano). Embora para um parque eólico o índice aceitável para a viabilidade do mesmo seja de aproximadamente 2000 horas por ano, em ambiente urbano, por exemplo, um bom índice, segundo investigadores do LNEG, será por volta de 1500 horas por ano. Outra forma de caracterizar a energia anual de uma turbina eólica é através do factor de capacidade. Este índice é muito idêntico ao anteriormente exposto (em horas por ano) mas com a diferença de ser dividido pelo número de horas anual, resumindo-se no quociente entre a Potência média anual e a Potência nominal, e por isso apresentado em percentagem. O factor de capacidade varia, teoricamente, entre 0 e 100 % mas na prática a sua escala vai desde 20 a 70 %, principalmente entre 25 e 30 % [27]. O factor de capacidade, embora intuitivamente se pretenda um factor elevado, nem sempre é economicamente viável.

### 3.4 - Avaliação de locais com potencial eólico

Para considerar um espaço favorável à implementação de sistemas eólicos, não basta que apresente incidência de ventos fortes. É fundamental, para além disso, conhecer o comportamento e sazonalidade do vento locais.

No entanto, segundo dados da *Canadian Wind Energy Association* - CanWEA [19], uma mudança de 10% na velocidade do vento poderá implicar uma alteração de 30% de potência disponível, surge a necessidade premente de conhecer o local mais favorável à obtenção de energia, ou seja, o local com maior potencial eólico.

O estudo da localização de uma única turbina ou de um sistema eólico de grande escala, quando não tiver de ser implementada num sítio específico, pode ser dividido segundo cinco passos principais [25]:

1. Identificação de zonas geográficas que necessitam de estudo aprofundado. É verificada a existência de estações anemométricas nas proximidades. Através dos dados do vento e do mapa de relevo da região, é possível seleccionar um local que apresente um comportamento que, em média, apresente melhores características do que os demais da região.

2. Selecção das áreas candidatas. São identificados os locais com potencial ventoso e onde a instalação de uma ou mais turbinas eólicas se prevê aceitável quer em termos técnicos quer por parte da população. Caso a natureza do terreno na zona prestigiada seja irregular, é necessária uma análise mais detalhada de forma a obter a área indubitavelmente mais privilegiada. Na presente fase é necessário atender a considerações topográficas, ecológicas e avaliação computacional de forma a avaliar o recurso eólico, bem como questões geológicas, sociais e culturais. Será ainda crucial a avaliação do sistema eléctrico local de forma a apurar a sua disponibilidade e necessidade.

3. Avaliação preliminar das áreas candidatas. Nesta fase, as áreas são ordenadas por potencial económico. Os locais mais viáveis serão então examinados quanto ao seu impacto ambiental, aceitação por parte da população, segurança e questões operacionais necessárias à implementação de turbinas eólicas. Posteriormente à escolha dos locais privilegiados, é imprescindível a realização de medições preliminares.

4. Avaliação final. Posteriormente à análise mais superficial, e caso seja favorável à implementação de turbinas eólicas, surge a necessidade de uma análise mais rigorosa, com medições específicas do local anteriormente evidenciado relativamente à velocidade do vento, direcção dominante e turbulência. Um dos pontos a abordar é relativo aos factores que condicionam o aproveitamento do potencial eólico, enumerados em 3.1.1. As estações anemométricas serão colocadas nos locais com maior potencial de forma a comprovar a localização indicada e com os dados por estas fornecidos será criado um histórico de comportamento.

5. Microposicionamento, vulgarmente conhecido por *Micrositing*. A partir do momento em que a área de implantação é definida, é necessário determinar a localização exacta das turbinas, dentro da área seleccionada, e a energia produzida. Para tal, são utilizados programas que modelam o desempenho do vento. No entanto, quanto mais complexo é o local, menos dados eólicos de locais próximos estão disponíveis e menos fiáveis estes são devido à irregularidade do terreno. Para estes casos, é imprescindível a medição mais detalhada em vários locais de forma a determinar o desempenho eólico para decisões à pequena escala. Esta avaliação poderá ser efectuada com um anemómetro, que gira com o vento e gera um sinal proporcional à velocidade do vento.

Este procedimento é então efectuado para os parques eólicos mas também pode ser adaptado às microturbinas, com a diferença de necessitar de uma análise mais precisa dos locais.

Pormenorizando um pouco mais a avaliação, e tendo em consideração os factores físicos referenciados, tais como o relevo, os obstáculos e a rugosidade, poderão ser seleccionados os locais com potencial eólico. O primeiro passo para a selecção dos locais é o conhecimento do regime dos ventos, tais como a rosa dos ventos e a distribuição de velocidade do vento, pois permitem obter as direcções dominantes e a velocidade do vento. A direcção do vento é uma variável muito importante daí ser sempre efectuada uma análise cuidada deste parâmetro através da construção de gráficos de frequência de ocorrência da velocidade por sectores, denominada rosa dos ventos. A figura 3.7 representa um regime dos ventos.

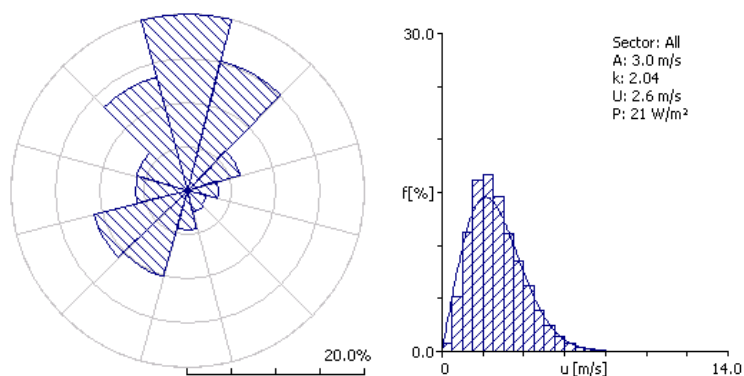
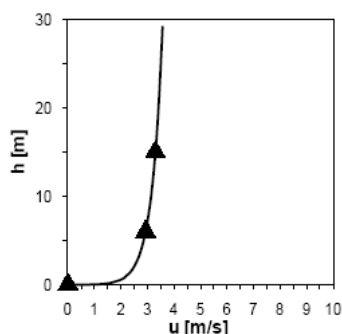


Figura 3.7 - Exemplo de rosa dos ventos e curva de distribuição da velocidade do vento [34]

Um potencial aceitável cinge-se normalmente a uma média anual de velocidade do vento de 4,2 m/s [9]. A altura da torre da turbina eólica relativamente ao solo é também muito importante, como já foi referido, uma vez que junto do solo a turbulência é mais notória.

Assim sendo, se a altura da torre aumentar de 10 para 50 metros, a quantidade de energia fornecida pelo vento duplica [9].



**Figura 3.8** - Relação entre a velocidade e a altura [34]

A velocidade do vento aumenta com a altura acima do solo sendo que a rugosidade e a presença de obstáculos têm grande influência neste factor. Assim, quanto maior a rugosidade do local menor relevância terá o aumento da velocidade do vento com a altura. Os locais com menor rugosidade serão os escolhidos para implementação de aerogeradores uma vez que para a mesma altura apresentam uma velocidade média do vento superior. Devido à orografia do terreno nas montanhas, estes locais também são preferidos pois ocorre uma aceleração do vento na superfície em questão.

Após a escolha de um local com potencial eólico, surgem ainda aspectos que podem afectar negativamente a área de implementação, e que possam ainda não ter sido considerados. Os parâmetros referidos envolvem questões [25]:

- Topográficas: acessos a vias de comunicação, declive do terreno em locais com potencial eólico;
- Legais: expropriações de terrenos para construção de parques, direitos de proprietários de terrenos adjacentes, autorizações;
- Geológicas: projectos de fundação, resistência de terra para protecção eléctrica, propensão de erosão;
- Ambientais: presença de áreas protegidas, rotas de pássaros ou espécies em vias de extinção no local de implementação do sistema eólico;
- De Aceitação do público: poluição sonora e visual, distância aos edifícios residenciais, presença de áreas marcantes de cariz cultural, arqueológico ou histórico, interferência com comunicações;
- De Segurança: relacionada com a proximidade a áreas habitadas ou a trilhos de caminhada;
- De Ligação: proximidade a linhas de potência e capacidade de tensão e corrente das linhas de potência.

### 3.5 - Estimação do recurso eólico

Os estudos para averiguar o potencial eólico são frequentemente mais dispendiosos que a própria turbina e sua implementação. Por esta razão, muitos investigadores ou fornecedores

instalam pequenas turbinas eólicas sem testar previamente o seu potencial ou até desistem à partida do negócio devido ao grande investimento necessário.

Existem várias formas de determinar o recurso eólico em locais candidatos. Cada um deles possui vantagens e inconvenientes e podem ser usados em diferentes etapas do processo de estimação do potencial eólico. Constata-se enorme divergência na catalogação dos métodos de determinação do potencial eólico, pelo que neste trabalho será adoptada, embora com algumas alterações, a divisão apresentada em [25].

### 1) Métodos Ecológicos

A deformação sofrida pela vegetação e causada por ventos fortes pode ser considerada um indicador da velocidade média anual do vento no local e um termo de comparação entre dois locais candidatos. Esta técnica é válida, por um lado, para a elaboração da abordagem inicial ao local e, por outro, para locais que não possuem dados do vento. A sua mais forte aplicação é em zonas costeiras, vales que apresentem forte escoamento eólico mas principalmente em zonas montanhosas, onde normalmente há falta de dados e fortes variações de escoamento em pequenas áreas, dificultando a sua caracterização.

Dentro da vegetação, o indicador eólico que mais se destaca são as árvores, não só pela sua altura como também pela sua duração de vida. O trabalho de investigação nesta área criou índices de deformação e relacionou-os com dados de longo prazo da velocidade do vento. Desta forma, é possível através da deformação de uma árvore e da consulta de uma tabela, obter a velocidade média do vento sentida no local.

### 2) Bases de Dados

Em Portugal foram produzidas importantes ferramentas para a avaliação do potencial energético e da energia do vento. Foi criada pelo INETI, no ano 2000, a “EOLOS 2.0”, uma base de dados do potencial eólico do vento em Portugal, que apresenta as características físicas e energéticas de vários locais de Portugal continental. É também constituída por uma folha de cálculo que tem por objectivo relacionar a viabilidade económica, em função do investimento. Embora esta base de dados seja uma ferramenta pontual, a sua contribuição foi relevante em zonas abrangidas pelas medidas do escoamento. Porém, não permite a cobertura total do território, facto que incitou o desenvolvimento de metodologias de mapeamento do potencial eólico como o atlas do vento.

### 3) Atlas Eólicos

De forma a efectuar o mapeamento de uma grandeza eólica, como a velocidade do vento, é necessária a avaliação da variabilidade temporal e espacial da superfície terrestre. Foram então desenvolvidos estudos de base pontual, recorrendo a dados de estações meteorológicas normalmente localizadas em zonas planas, que permitiram a realização do mapeamento do recurso eólico. Posteriormente, os dados eram extrapolados para locais com maior altitude, pois aí era previsto um maior potencial.

Todavia, e dado que os locais para os quais era efectuada uma extrapolação eram subestimados quanto ao seu potencial, cresceu a necessidade de desenvolvimento do Atlas Eólico Europeu.

Na figura 3.9 está representado o Atlas Eólico Europeu para a cota de 50 metros. Este mapa foi modelado para cinco classes de terreno, caracterizadas por diferente rugosidade e surge da combinação da velocidade e do fluxo de potência.

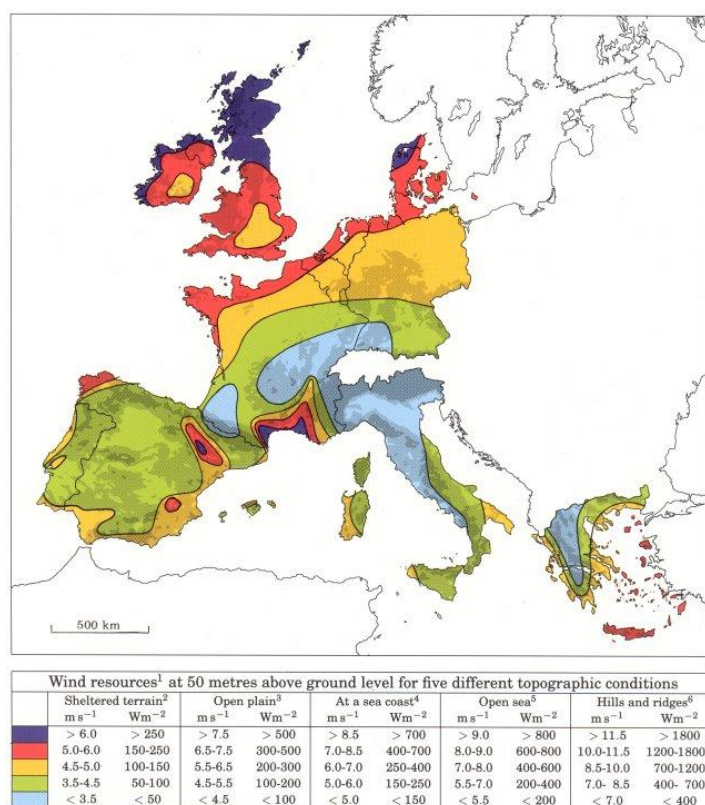


Figura 3.9 - Atlas Europeu do Vento [35]

O atlas apresentado na figura 3.9 inclui dados de terreno, direcção do vento e parâmetros de Weibull, provenientes de 220 locais da Europa. De forma a obter dados de referência que caracterizam de forma fidedigna uma determinada área, são filtrados os efeitos causados pelos factores que influenciam o recurso eólico, tais como a rugosidade, topografia e obstáculos.

O procedimento tem início na comparação de locais e inclui fórmulas de correcção para os parâmetros de Weibull. Estes parâmetros, juntamente com informação de direcção do vento, podem ser utilizados para a obtenção da velocidade do vento anual.

Apesar de o Atlas Eólico representar uma ferramenta fundamental na avaliação do recurso eólico de uma determinada região, esta ferramenta é pouco precisa se for pretendida uma análise mais minuciosa.

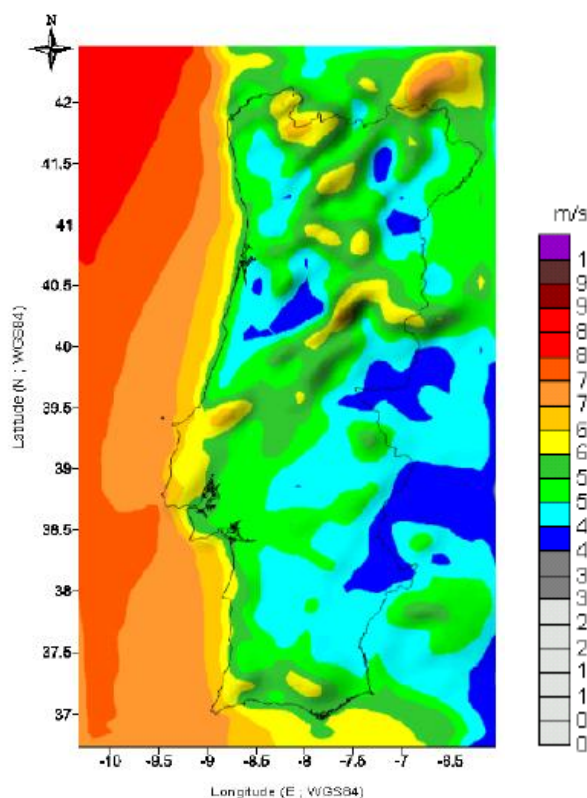
Em Portugal Continental, o INETI desenvolveu e validou o Atlas do Potencial Eólico Português. O Atlas Eólico, quer nacional quer regional, revela-se um poderoso indicador da existência de vento, apresentando características do recurso e respectiva estimativa de

produção eólica. Constitui desta forma um instrumento auxiliar de decisão de futuros investimentos em campanhas experimentais e de planeamento de redes eléctricas.

A obtenção de um mapa caracterizador do potencial eólico é possível com o recurso a modelos de mesoscala uma vez que é necessária a simulação da evolução temporal e espacial do escoamento, classificando a climatologia dos processos físicos de mesoscala associados à orografia da região.

De forma a criar o referido atlas eólico, o INETI seleccionou o modelo MM5 - *Fifth Generation Mesoscale Model* - devido ao seu estado progressista de reprodução do comportamento eólico. Uma vez que o referido modelo é à grande escala, os pormenores são posteriormente corrigidos, tendo por base os dados estatísticos de longo prazo obtidos através das estações anemométricas implementadas pelo próprio INETI.

De acordo com a versão preliminar do atlas do potencial eólico de Portugal Continental, a resolução espacial é de 9x9 km. A figura 3.10 apresenta um destes estudos, expondo a velocidade média horizontal para a altura de 60 metros e com a resolução referida.



**Figura 3.10** - Velocidade média horizontal a 60 metros (m/s), 1999 [36]

Para além deste atlas eólico e sua exploração, o INETI efectuou também um estudo entre o potencial eólico e a capacidade da rede por região. A figura 3.11 apresenta a referida avaliação. A primeira imagem da figura diz respeito à previsão da capacidade da rede para o ano de 2013, a segunda imagem faz referência ao potencial eólico sustentável, ou seja, ao relativo potencial eólico em cada zona do país com base no atlas eólico, e a terceira imagem traduz a conjugação de ambas, estabelecendo uma relação entre o potencial eólico e a capacidade da rede.

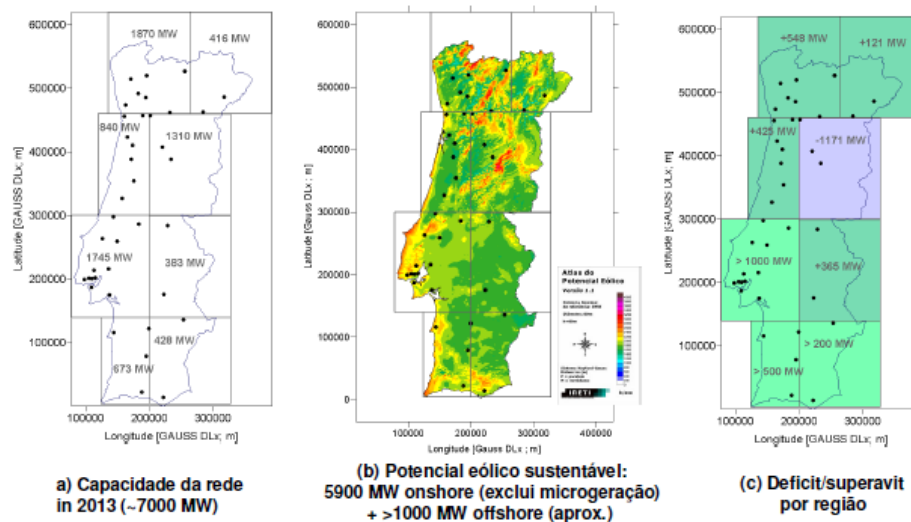


Figura 3.11 - Relação entre o potencial eólico e a capacidade da rede [37]

A avaliação do potencial sustentável de um país consiste num procedimento crucial, considerando fontes de energia renováveis e respectiva contribuição na redução das emissões de gases poluentes de forma a cumprir objectivos estipulados. O mapeamento do potencial sustentável poderá constituir uma contribuição para o planeamento da rede eléctrica de forma a otimizar os recursos [38].

#### 4) Modelação Computacional

A estimação do vento em diversos locais também pode recorrer a programas de modelação computacional, utilizando informação topográfica e meteorológica.

A resolução dos mapas das figuras 3.10 e 3.11, embora eficiente na representação climatológica do escoamento na orografia média, é pouco precisa em terreno complexo. Para tais casos, foram efectuadas novas simulações, de resolução espacial 3x3 km e 1x1 km, para validações do atlas, com dados provenientes de campanhas experimentais de medição dos parâmetros estatísticos do vento acrescidos de dados resultantes de um modelo numérico de microescala, o *WA<sup>5</sup>P* (Wind Atlas Analysis and Application Program), que caracteriza o escoamento de forma mais pormenorizada aquando da presença de obstáculos ou rugosidade.

O *WA<sup>5</sup>P*, modelo linear, é o modelo numérico mais utilizado na Europa e foi desenvolvido com intenção da criação de uma ferramenta que permitisse a utilização dos dados do Atlas Europeu do Vento, apresentado na figura 3.9. O *WA<sup>5</sup>P* utiliza um modelo simples que determina o escoamento do vento no local candidato à implementação da turbina eólica. O regime de ventos de um local é estimado recorrendo a dados existentes para um local de referência, normalmente registos meteorológicos disponíveis relativos a um intervalo de tempo considerável (daí o mapa considerado ser referente ao ano de 1999). Os dados de referência pretendem obter o escoamento livre característico da área. Para isso, a informação é filtrada de forma a remover os efeitos provocados pelas condicionantes ao regime de ventos. Posteriormente, os efeitos locais do terreno são adicionados e é efectuada uma correcção para a altura da turbina, obtendo desta forma a perspectiva de potencial no local desejado. De forma a obter resultados de confiança, é óbvia a necessidade de



proximidade entre a estação de referência e o local a analisar, de forma a experimentarem regimes de vento análogos. Têm sido realizados vários estudos comparativos entre resultados teóricos, obtidos por utilização do modelo  $WA^5P$ , e resultados experimentais, de forma a testar o modelo em questão. A conclusão desta análise remete para projecções aceitáveis em terrenos planos ou pouco inclinados. Já em planos com orografias complexas, e devido ao facto de este modelo ser um pouco grosseiro, o  $WA^5P$  não obtém uma previsão tão precisa quanto desejável. Estes modelos não são, portanto, aconselháveis em ambiente urbano uma vez que os resultados obtidos são de 1 km por 1km, pelo que há pouco detalhe para uma análise que pretende ser rigorosa. Outro motivo é o facto de não se tratar de modelos a três dimensões, não traduzindo assim o comportamento exacto dos efeitos dos obstáculos no vento, ocorrendo portanto sobrestimação do potencial eólico.

Uma alternativa aos atlas eólicos seria a tecnologia CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Por oposição ao modelo referido anteriormente, o  $WA^5P$ , que efectua estatísticas eólicas parametrizando a influência da orografia e obstáculos, os modelos CFD avaliam computacionalmente o comportamento do recurso eólico a três dimensões. Esta ferramenta de dinâmica de fluidos computacional, CFD, tem elevada aplicação em diversas áreas da engenharia envolvendo o transporte de fluidos. O aumento contínuo da capacidade de cálculo disponível aliado à melhoria na precisão desta ferramenta tem gerado um interesse crescente neste método. Por esse motivo, a utilização de CFD é uma das áreas em mais rápida expansão na mecânica dos fluidos, principalmente na análise de sistemas complexos, simulando a circulação do vento em torno dos obstáculos [25].

A mecânica dos fluidos pode ser descrita pelas equações de Navier-Stokes. De forma a resolver escoamentos turbulentos, muito comuns em sistemas complexos como os urbanos, as equações são normalmente convertidas em equações de Reynolds Average Navier-Stokes - RANS. Um dos programas que utiliza este tipo de tecnologia CFD denomina-se *UrbaWind* e será explorado mais adiante no Capítulo 4, bem como a resolução dos escoamentos e respectivas fórmulas. Também o software “VENTOS”, criado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em colaboração com o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC-Porto) e o Research Centre for Wind Energy and Atmospheric Flows (RCWEAF) é utilizado para simulação computacional do comportamento do escoamento do vento em solos complexos.

## 5) Modelação Física

Os modelos físicos da topografia do terreno são realizados à escala e colocados num túnel de vento artificial, reproduzindo condições de vento o mais semelhantes possível com as do local. Uma vez que a realização destes ensaios permite caracterizar o vento em vários locais e a alturas distintas, é a solução para o problema da complexidade dos terrenos, tornando estes modelos os mais fidedignos. Esta técnica permite ainda a obtenção de resultados em poucas semanas. No entanto, a construção de modelos a três dimensões e a utilização de túneis são muito dispendiosos, factor que remete para a utilização de outros modelos que, embora não proporcionem resultados tão exactos, são mais económicos e portanto mais viáveis.

A forma mais fiável de todas cinge-se à colocação de um anemómetro na zona de possível implementação de uma pequena turbina eólica e, consoante os resultados obtidos, concluir sobre a viabilidade desta instalação. Este procedimento físico é obviamente muito dispendioso e demorado, impensável de ser realizado para todos os sítios em que se pretenda realizar a avaliação do potencial eólico.

### 3.6 - Ambiente urbano

A concentração das pessoas nas áreas urbanas incita o aproveitamento do recurso eólico nessas mesmas áreas. Embora a geração distribuída em áreas residenciais e industriais esteja em desenvolvimento, a integração desta tecnologia em áreas urbanas parece ser mais premente uma vez que proporciona uma solução para responder à procura de electricidade, em locais em que a referida procura é mais acentuada.

A abordagem à microgeração em ambiente urbano é indubitavelmente mais complexa devido à grande quantidade de obstáculos que requerem abordagem prévia, de forma a contribuir para uma análise fidedigna do local. A referida complexidade do ambiente em questão justifica as incertezas intrínsecas ao potencial eólico em regime urbano. De forma a analisar um simples edifício plano são necessárias várias considerações tais como a criação de zonas de pressão positiva na área frontal do edifício ou negativa nas laterais e traseira, que por sua vez influenciam a direcção do vento causando turbulência. O escoamento é então obstruído pelo edifício formando esteiras com movimentos circulares irregulares, *vórtices area*, a montante e a jusante do mesmo - *Wise Effect*. O perfil do vento pode ser caracterizado pelos vórtices criados em forma de ferradura, descrição observável na figura 3.12.

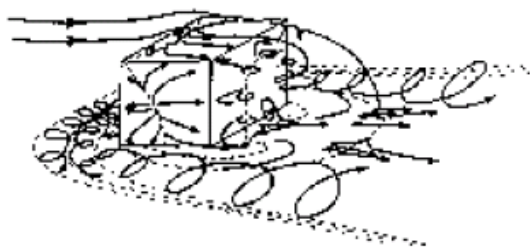


Figura 3.12 - Impacto do percurso do vento na base de um edifício cúbico [39]

Os movimentos representados na figura anterior evidenciam um aumento da turbulência, o que terá uma influência considerável na análise do potencial eólico. A zona afectada por um edifício cúbico é de duas vezes a sua altura na vertical e atinge doze vezes a sua altura na horizontal [39], de onde se pode concluir que um só edifício pode alterar notavelmente o potencial eólico de uma determinada zona urbana. A figura 3.12 ilustra precisamente a influência de um determinado obstáculo, que poderá ser um edifício ou uma árvore, no desempenho de turbinas eólicas nas proximidades. A obstrução causada pelo edifício na horizontal é, na referida figura, considerada superior (20H) à referida anteriormente (12H). Existem mais uma vez várias teorias divergentes relativamente a este assunto.

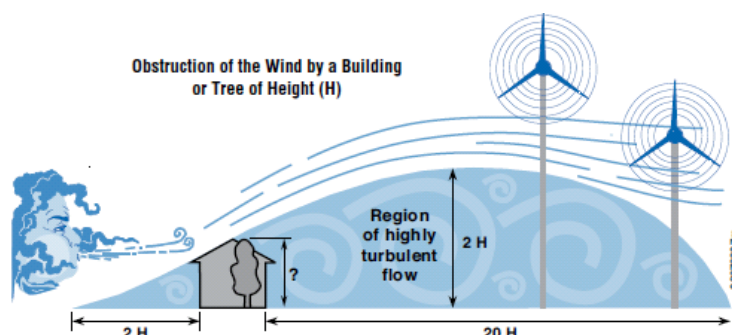


Figura 3.13 - Alteração do percurso do vento provocada por obstáculo [19]

A figura anterior denota uma zona crítica, no topo do edifício, devido à turbulência. Para o caso de edifícios cúbicos esta evidência ainda é mais explícita. A diferença desta imagem para a situação urbana é que, para além da turbina eólica ser bastante inferior, o local de implementação, embora também ocorra no solo, é mais usual no topo dos edifícios, que dominam o ambiente urbano.

A integração de pequenas turbinas eólicas no topo de edifícios ou junto destes, pressupõe a máxima eficiência, quer técnica quer económica, por parte da arquitectura dos edifícios ou da localização das microeólicas, respeitando os limites de ruído e vibração.

A problemática da avaliação do potencial eólico em regime urbano deve-se então à escolha de um local adequado para implementação da pequena turbina eólica, que por um lado tenha vento e que por outro lado não possua turbulência. Uma vez satisfeita a primeira condição, ou seja, ser ventoso, é agora necessário definir a zona turbulenta para que esta seja ultrapassada, através da colocação do mastro de forma a que a pequena turbina esteja acima da zona crítica. No entanto, caso a colocação do pequeno aerogerador seja efectuada no topo dos edifícios, é inevitável a oscilação do mastro. Para além disso, a vibração induzida na torre da turbina é directamente proporcional à sua altura.

As condições do vento na camada urbana são portanto muito complexas. Podem ocorrer dois tipos de situação: para a presença de ventos regionais fortes, situação mais comum, a rugosidade aerodinâmica da cidade é dominante, provocando não só turbulência como também a redução da velocidade na área urbana, devido ao atrito respectivo sobre o fluxo de ar. Constatando-se ventos regionais fracos, a velocidade do escoamento tende a aumentar em ambiente urbano, devido à discrepância entre a estabilidade atmosférica rural e a crescente turbulência da zona urbana, cuja superfície é mais quente e irregular [40].

Dependendo essencialmente da morfologia da cidade (barreiras físicas e respectiva orientação e dimensão), podem então ocorrer efeitos de aceleração do escoamento do vento. Principalmente no seio de edifícios altos, e devido à compressão do ar, a velocidade do escoamento eólico aumenta. O fenómeno descrito é denominado Efeito de Túnel (ou também Efeito Venturi), e é caracterizado fisicamente pela redução da pressão do fluido, que resulta da passagem deste fluido através de um tubo de reduzida secção. A velocidade do fluido terá de aumentar na zona de secção mais reduzida de forma a satisfazer a equação de continuidade e a diminuição da pressão, garantindo assim a conservação da energia. A colocação de uma pequena turbina eólica num túnel de vento é uma forma inteligente de obter velocidades do vento superiores às constatadas nas proximidades. Existe já a ideia de

criação de túneis artificiais de forma a combinar os edifícios com a paisagem envolvente e assim obter melhores valores de velocidade. No entanto, de forma a obter um efeito de túnel eficaz, é necessário atender a dois factores muito importantes: Primeiro, que este esteja devidamente integrado na envolvente, caso contrário será constatada turbulência e o vento mudará brusca e rapidamente de direcção. Para o caso de haver muita turbulência, este factor negativo anula completamente a vantagem de possuir velocidades superiores devido à dificuldade na extracção de energia e ao desgaste que lhe é inerente [27]. Segundo, esta aceleração, normalmente não planeada e com ocorrência junto dos edifícios mais altos, pode induzir desconforto pedonal devido à colisão do vento com o edifício. O conforto e a segurança pedonais deverão ser tidos em consideração quando se pretende deliberadamente acelerar o escoamento eólico, uma vez que é desejável que a velocidade do vento seja reduzida junto a passeios e espaços públicos [28]. É portanto fulcral ter em consideração os detalhes dos edifícios e os *urban canyons* (descritos por gargantas urbanas formadas por ruas entre edifícios altos), tal como as respectivas dimensões e orientações, uma vez que estes têm um grande impacto no efeito turbulento do vento próximo do solo.

Existe ainda outro efeito relevante, registado em ambiente urbano, e denominado Efeito de Esquina (*Corner Effect*). Este consiste na verificação de maior velocidade do vento após uma esquina (cerca de 1,2 a 2 vezes superior) e quanto mais próximo da esquina, mais notório é o efeito.

Apesar de o vento, devido à complexa envolvente em ambiente urbano, não ser tão potente relativamente a outras áreas, verifica-se ainda assim a instalação de pequenas turbinas eólicas nos telhados ou em torre. Uma vez surgidos incentivos para a aplicação, esta tecnologia é cada vez mais comum, pretendendo-se um equipamento cada vez mais fiável e silencioso para o tipo de ambiente turbulento com que terá de lidar. Surge, no entanto, uma polémica que envolve a integração urbana das pequenas turbinas eólicas e a respectiva “poluição visual” que estes equipamentos possam provocar, estando estes factos na base de muitas contestações. Por oposição, também há quem responda que mais importante que a beleza é a funcionalidade, ou seja, o objectivo principal não é que a turbina seja uma obra de arte no quintal mas que esta possa produzir electricidade: “Remember, do you want yard art or electricity?” - Mick Sagrillo.

Para tentar pôr fim a estas dicotomias, surge a ideia de, em vez de colocar os equipamentos ao lado ou no topo dos edifícios, que estes façam parte integrante dele, consistindo na sua estrutura ou apenas como fachada, como apresentado na figura 3.14.



**Figura 3.14** - Projectos futuristas de aproveitamentos eólicos em ambientes urbanos [37]

A figura 3.14 representa uma das muitas ideologias relativas à integração de pequenas turbinas nos edifícios. Este tipo de implementação é ainda muito recente, pelo que ainda não existem muitos dados relativamente ao seu grau de eficiência.

### 3.7 - Síntese da avaliação do recurso eólico

O recurso eólico foi abordado neste capítulo em todas as suas vertentes. Foram analisados 1) os factores que condicionam o seu potencial, bem como as fórmulas para efectuar a transposição em caso de falta de dados, 2) a representação estatística do vento, concluindo que este pode ser aproximado por uma distribuição de Weibull ou Rayleigh e desta forma ser mais fácil a sua representação uma vez que são curvas conhecidas, 3) a energia produzida, a fórmula de ser obtida e os parâmetros que intervêm no seu cálculo, 4) a avaliação de locais com potencial eólico e passos a percorrer para efectuar essa mesma avaliação, que necessita de ser exaustiva para a pequena escala, 5) a estimação do potencial eólico, incluindo os métodos e ferramentas utilizadas para esta determinação, e finalmente 6) o ambiente urbano, de forma a caracterizar a maior complexidade neste tipo de ambiente e a mais difícil obtenção de resultados favoráveis à implementação de pequenas turbinas devido à existência de espaços densamente edificadas.

A realização desta avaliação do recurso permite concluir que os espaços favoráveis à implementação de pequenas turbinas eólicas têm de ser de destaque relativamente à sua envolvente no que toca à altura, uma vez que a presença de obstáculos obstrui o percurso e desempenho eólico. Uma regra de ouro (*Rule-of-thumb*) é que num raio de 90 metros do local de implementação de uma pequena turbina eólica, nenhum objecto se diferencie em menos de 9 metros do topo da torre eólica.

O factor chave para um bom desempenho eólico é sempre a escolha de um local que possua vento - “*A wind turbine without wind is like the proverbial fish out of water*” - William Kemp.



# Capítulo 4

## Caso de Estudo

A avaliação do potencial eólico em regime de microgeração é um tema premente e de grande utilidade nos dias que correm, uma vez que para apostar na eficiência energética não se pode descurar a integração da produção junto dos consumidores. Surge então o conceito *Prosumer*, que como o nome sugere é uma fusão de *producer* e *consumer* ou produtor e consumidor, respectivamente. Este conceito, como já foi referido anteriormente, acarreta grandes vantagens quer para o próprio indivíduo que se rege no conceito de *Prosumer*, quer para o país e respectiva sustentabilidade.

De forma a comprovar a teoria apresentada nos capítulos anteriores, relativamente à energia eólica à pequena escala e aos factores que influenciam o aproveitamento do recurso eólico bem como à energia que poderá ser obtida em diferentes locais, será neste capítulo apresentado um estudo prático do tema proposto.

### 4.1 - Objectivos

O objectivo deste capítulo é a avaliação *in loco* do potencial eólico em aplicações em regime urbano ou em edificado apropriado para aplicações de microprodução. Para tal, foram simulados ambientes hipotéticos, de forma a aferir a influência de diversos factores, nomeadamente o edificado, no desempenho das turbinas. Através da análise do seu impacto no comportamento do vento, é assim possível a avaliação da optimização da instalação de pequenas turbinas eólicas.

Os assuntos recorrentes neste tipo de projecto de pequenas turbinas eólicas são, por exemplo, o local de implantação de uma pequena turbina numa determinada região e a altura do respectivo mastro. Intuitivamente associa-se um local com muito vento a um local com potencial eólico mas existem outros factores a ter em consideração.

A turbulência, caracterizada por um escoamento caótico, provoca rajadas de vento. Estas últimas são descritas por aumentos repentinos da velocidade do vento, tornando-o extremamente variável, e representando assim um factor negativo para a extracção de

energia do escoamento eólico e ainda possivelmente destruidor. As rajadas de vento transformam a turbulência, criada quer nas arestas dos edifícios quer na sua envolvente, num factor determinante do local de implantação das turbinas eólicas.

Assim sendo, o objectivo principal desta temática é relativo à obtenção de locais que, por um lado, possuam velocidade significativa mas que por outro lado possuam reduzida turbulência. A avaliação deste binómio está então na base da avaliação do potencial eólico em regime de microgeração.

Para tal, é preciso atender aos factores que condicionam o aproveitamento do potencial eólico, apresentados no subcapítulo 3.1, pois estes condicionarão quer a velocidade quer a turbulência do escoamento eólico. Estes parâmetros são a altura, a orografia, e obstáculos e rugosidade. Neste estudo será atendida a altura, uma vez que serão criados pontos e superfícies de diferentes alturas de forma a confirmar que a diferença altera o aproveitamento eólico. A orografia não será abordada directamente uma vez que não existiam dados de relevo característicos do local onde será efectuada a simulação, mas será avaliada indirectamente devido aos dados de vento inseridos. Relativamente aos obstáculos e rugosidade, será avaliada a influência de uns edifícios com os restantes durante as simulações.

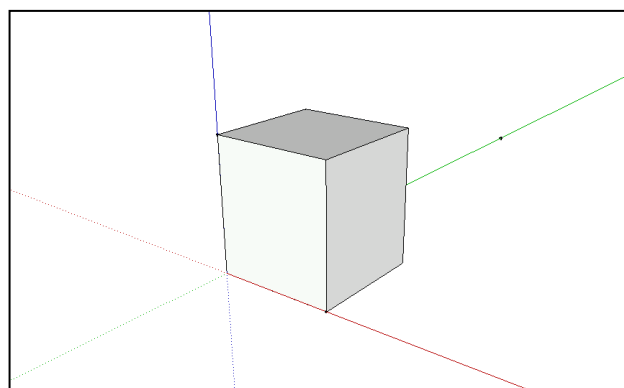
De forma a efectuar a referida avaliação, são criados quatro cenários diferentes, de forma a proporcionar uma comparação e discussão dos resultados inerentes.

## 4.2 - Cenários

A criação dos vários cenários envolve o desenho de edifícios a três dimensões e sua disposição para posterior simulação. Para tal, foi utilizado o *software Google SketchUp*, versão 7.1, que permite precisamente o recurso a estas funcionalidades [41].

### 4.2.1 - Cenário 1

O primeiro cenário efectuado apresenta apenas um edifício regular, com dimensões de base de 8 metros por 8 metros e de 9 metros de altura. A figura 4.1 apresenta o desenho referido, obtido através do *software Google SketchUp*.

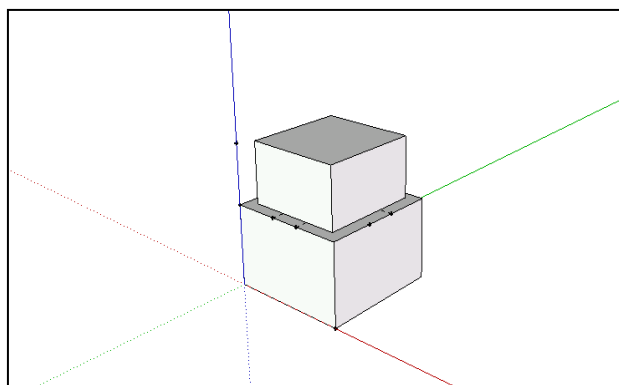


**Figura 4.1** - Representação de Edifício Regular, de dimensões 8x8x9 metros, obtido por *Google SketchUp*



### 4.2.2 - Cenário 2

De forma a aferir a relevância do porte de um edifício na avaliação do potencial eólico de um local, o segundo cenário é idêntico ao primeiro uma vez que, embora a base do sólido e a altura tenham as mesmas dimensões do sólido do cenário 1, possui uma ligeira alteração na parte superior do edifício, pois apresenta um pequeno recuo relativamente à parte inferior do bloco. Esta alteração é evidenciada na figura 4.2.

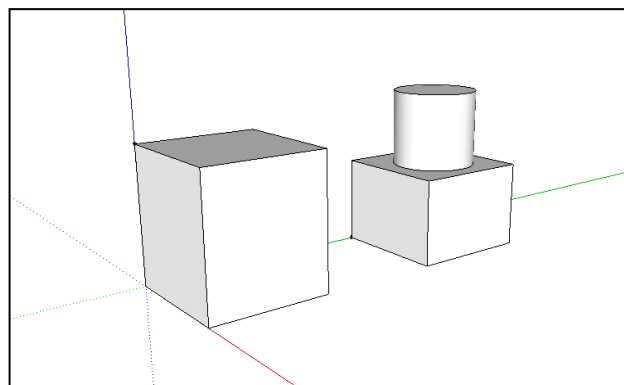


**Figura 4.2** - Representação de Edifício Irregular, de dimensões de base de 8x8x9 metros, obtido por *Google SketchUp*

Dependendo do resultado obtido, poderão tirar-se conclusões acerca da configuração dos edifícios e da sua influência na energia passível de ser obtida, assunto fulcral nesta avaliação de potencial eólico, tornando-se também num tema recorrente em projectos urbanos. Existirá desta forma a necessidade de estudo relativamente à construção de edifícios favoráveis ao desempenho do recurso eólico e/ou a colocação estratégica das pequenas turbinas eólicas em locais favoráveis à extracção de vento, como por exemplo em locais onde haja concentração de linhas de corrente do escoamento em determinadas direcções, causadas por pontos de irregularidade, e que motivam a aceleração deste escoamento.

### 4.2.3 - Cenário 3

De forma a aferir a relevância do porte de um edifício na avaliação do potencial eólico de um outro, o terceiro cenário é no fundo a junção dos dois primeiros. Um dos edifícios constituintes deste cenário, o edifício regular, é igual ao representado no primeiro cenário. O segundo edifício, embora irregular como o referente ao segundo cenário, tem uma estrutura um pouco diferente deste, pois apesar de a base do sólido ser idêntica (embora de altura inferior), é-lhe acrescentada uma parte superior cilíndrica. A altura final do referido edifício é um pouco superior à do edifício regular (dois metros). Esta alteração é evidenciada na figura 4.3.



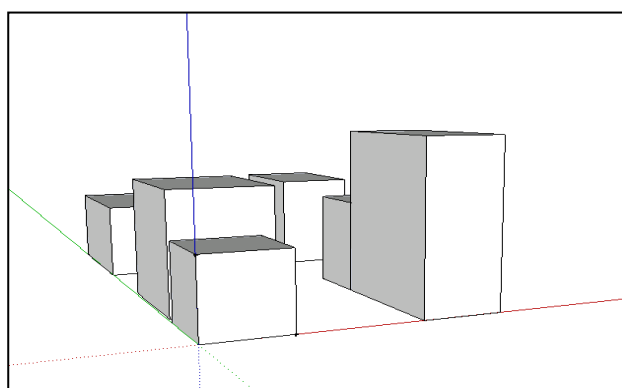
**Figura 4.3** - Representação de Edifício Regular de 8x8x9 metros e de Edifício Irregular, de dimensões de base de 8x8x11 metros, obtido por *Google SketchUp*

Dependendo do resultado obtido, poderão tirar-se conclusões acerca da influência que um edifício pode exercer no vizinho. O enfoque da avaliação deste cenário será a comparação do comportamento eólico no edifício regular num caso isolado (cenário 1) com o obtido na presença de um outro edifício (presente cenário).

#### 4.2.4 - Cenário 4

O quarto cenário já possui uma estrutura completamente diferente uma vez que representa uma pequena rua em ambiente urbano. Esta simulação de rua possui vários edifícios, de estrutura semelhante ao primeiro cenário, mas com alturas diferentes entre eles. Este cenário é mais realista e tem como objectivo principal a avaliação do impacto de vários edifícios no recurso eólico e a comprovação de efeitos de túnel de vento entre estes. Na existência de mais que um edifício, e devido ao espaço criado entre eles e às respectivas irregularidades, é criado um túnel de vento. A consequência deste facto é a aceleração do escoamento do vento.

A figura 4.4 representa uma vista frontal de uma pequena rua em ambiente urbano.



**Figura 4.4** - Representação de uma rua, com edifícios de várias dimensões, obtido por *Google SketchUp*

### 4.3 - Software Urbawind

De forma a efectuar a simulação dos cenários expostos no subcapítulo anterior, recorreu-se a um recente software francês, denominado *Urbawind*. Este *software*, desenvolvido pela empresa *Meteodyn - Meteorology & Dynamics* - é membro da EWEA e da AWEA [42].

O *software Urbawind* abrange efeitos intrincados de avaliação do escoamento eólico em ambiente urbano e garante assim uma previsão precisa das características do vento [43]. Tal como referido no subcapítulo 3.6, e comparando com áreas rurais, a morfologia urbana é muito complexa e tem enorme influência no escoamento eólico. Os efeitos dos edifícios no vento, como a criação de vórtices (*wake effect*), o efeito de túnel (*Venturi effect*) e o efeito de esquina (*corner effect*), contribuem para uma modelação do vento bastante complicada e imprevisível. No entanto, estes efeitos podem ser simulados através do *software Urbawind*, que utiliza a técnica CFD, referida anteriormente no subcapítulo 3.5, resolvendo equações de mecânica dos fluidos e representando a turbulência na envolvente urbana.

A solução numérica de problemas de mecânica de fluidos requer a resolução das equações de Navier-Stokes, já referenciadas no Capítulo 3. Os problemas de escoamento de fluidos são descritos matematicamente por estas equações, que se baseiam em derivadas parciais e não lineares. Estas derivadas provêm da segunda lei de Newton e descrevem a conservação do momento no escoamento. Os passos dados pelo software na determinação deste problema serão detalhados em Anexo.

O *software* utilizado é facilmente perceptível na óptica do utilizador. Serão ilustrados alguns parâmetros relativos à interface gráfica, de modo a ser perceptível a evolução da introdução dos parâmetros.

De forma a construir o ambiente de simulação, é apresentado um espaço para introdução dos dados da área a analisar, apresentada, na figura 4.5.

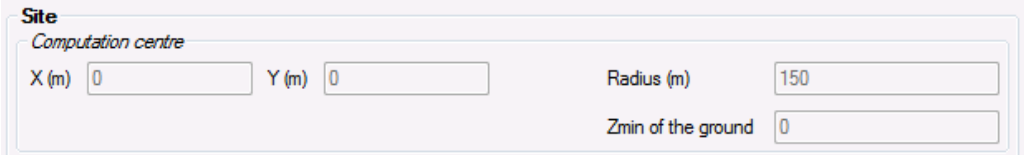


Figura 4.5 - Local de introdução de dados relativos à área de análise, por *Urbawind*.

Como é observável na figura 4.5, é necessário introduzir o centro de computação do local (coordenadas  $X$  e  $Y$  em metros (m)), que será a referência para a simulação dos edifícios e respectivos planos de análise. O raio introduzido é de 150 metros, de forma a possuir espaço suficiente para a análise não só das estruturas como também da envolvente. O campo  $Z_{min}$  diz respeito à altura de referência.

Seguidamente são introduzidos, na secção *CAD* da figura 4.6, os dados referentes ao desenho efectuado no *Google Sketchup*, apresetados anteriormente. Serão então analisados os dados relativamente aos obstáculos e à relação de interferência entre eles.

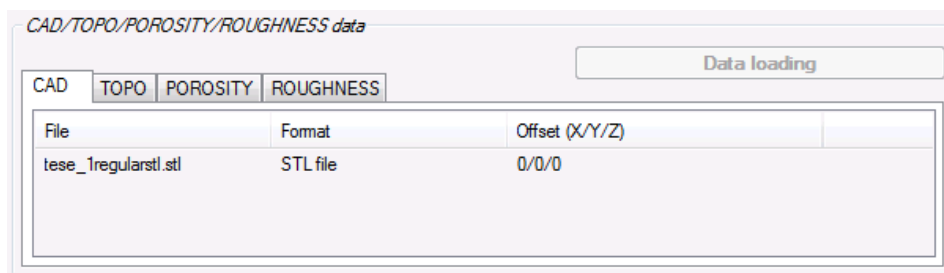


Figura 4.6 - Local de introdução de dados relativos aos edifícios para análise, por *Urbawind*.

O ficheiro inserido na figura 4.6, *tese\_1regular*, refere-se à primeira simulação, porém aqui tem apenas o papel de exemplo.

Relativamente às três secções, *Topo*, *Porosity* e *Roughness*, relativas a Topografia, Porosidade e Rugosidade, respectivamente, não foram introduzidos dados. Estes parâmetros serão abordados indirectamente, aquando da introdução dos dados de vento de uma dada região. A simulação mais precisa e abrangente poderá ser um bom objectivo para possíveis trabalhos futuros.

O passo seguinte é a introdução das áreas de interesse a analisar, tais como superfícies e pontos. Na figura 4.7 são apresentadas as superfícies, no entanto os pontos seguem um esquema idêntico.

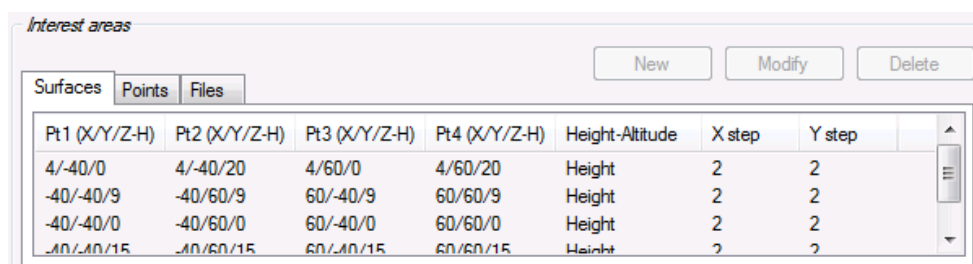


Figura 4.7 - Introdução de dados relativos às áreas de interesse, de forma a criar superfícies, por *Urbawind*.

Os dados apresentados na figura 4.7 foram introduzidos de forma a criar as superfícies. Os valores são relativos ao centro de computação introduzido. Relativamente aos parâmetros *X step* e *Y step*, são respeitantes à malha e respectiva dimensão. Assim sendo, na malha criada, os pequenos quadrados são de 2 metros por 2 metros.

A malha criada na envolvente dos edifícios tem como objectivo a análise do comportamento eólico num determinado segmento de plano, com características seleccionadas para o efeito. O *software Urbawind*, desta forma, reproduz as condições pretendidas relativamente ao espaço de implementação.

Posteriormente, o *software* efectuará a distribuição do vento (velocidade e direcção) ao longo do local em estudo, a descrição estatística dos coeficientes de Weibull e o cálculo da turbulência, da pressão e das rajadas de vento verificadas, para diferentes alturas e direcções. Constitui, portanto, uma ferramenta fulcral para o cálculo do potencial eólico energético nas cidades.

Relativamente aos dados de vento utilizados, e uma vez que em Portugal não existem dados eólicos medidos em ambiente urbano, recorre-se aos dados fornecidos pelo *software*

*Urbawind*. Uma vez que a simulação é num ambiente hipotético, com o intuito de avaliar o potencial energético de forma genérica, o local proveniente dos dados de vento introduzidos não é relevante, desde que sejam conhecidas as suas características.

No *Urbawind*, o utilizador pode então escolher dados referentes a uma dada região, quer anuais quer sazonais. O utilizador necessita apenas de indicar o local de implementação da pequena turbina eólica. O local de medição escolhido, um entre as várias hipóteses concedidas e todas francesas, é *Hautes-Alpes*, como apresentado na figura 4.8.

Figura 4.8 - Introdução de dados relativos às áreas de interesse, de forma a criar superfícies, por *Urbawind*.

É possível assinalar os dados meteorológicos anuais referentes a uma dada região, neste caso *Hautes-Alpes*.

Os dados foram obtidos através de uma base de dados com 120 estações meteorológicas francesas aos quais foram aplicadas correcções de rugosidade regional, uma vez que as estatísticas representam o vento médio a 100 metros de altura. Estas referências foram adoptadas de forma a obter dados estatísticos nas zonas urbanas.

O histograma de velocidades e a rosa dos ventos relativos ao local considerado são apresentados na figura 4.9. O histograma apresenta a distribuição da velocidade de ventos, já abordada no capítulo 3. Relativamente à rosa dos ventos, é uma ferramenta muito útil para a escolha da localização das turbinas eólicas uma vez que apresenta a direcção do vento dominante. Se uma grande fracção da energia proveniente do vento possuir uma determinada direcção, é aconselhável que haja nessa direcção o mínimo de obstáculos possível e um terreno tão suave quanto possível. É importante frisar também que os dados de vento se alteram de ano para ano (tipicamente 10%) pelo que é aconselhável possuir dados de vários anos para a análise ser fiável. No caso deste *software*, e uma vez que os dados são provenientes de estações meteorológicas, possuem normalmente estas características.

Estes resultados são relativos às condições iniciais, ou seja, ainda sem a presença de edifícios.

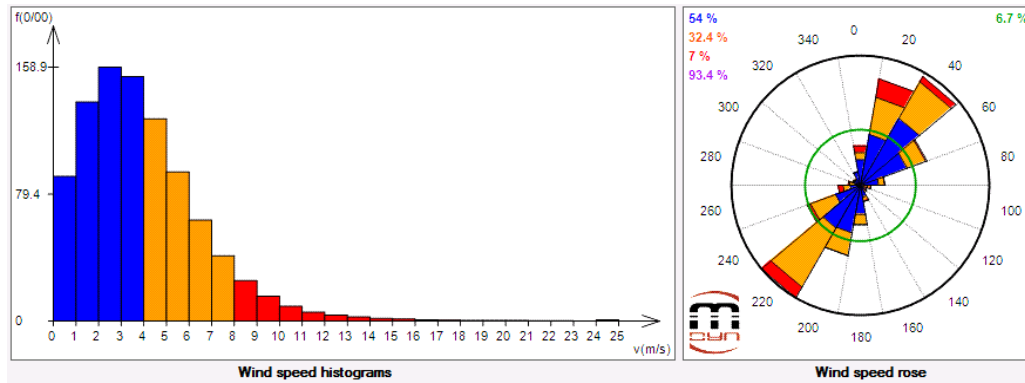


Figura 4.9 - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de *Hautes-Alpes* para as condições base, por *Urbawind*.

De forma a obter dados mais concretos foi calculada a velocidade média da série de vento inicial a partir do histograma da figura 4.9.

A fórmula que permite o cálculo da velocidade média é:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \times \sum(f \times v) \quad (4.1)$$

$n$  = soma das frequências (em percentagem)

$f$  = frequência

$v$  = velocidade (m/s)

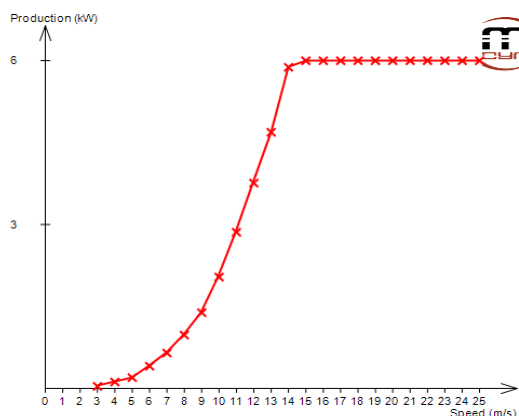
Assim sendo, e possuindo o valor exacto das frequências, fornecido pelo *software*, foi calculada a média das velocidades. O valor obtido foi:

$$\bar{v} = \frac{1}{93,36} \times 372,49 = 3,989 \text{ m/s} \quad (4.2)$$

Este valor vai ser utilizado, mais adiante, para comparar com os valores das velocidades médias obtidos para os vários cenários, de forma a analisar o impacto do edificado na velocidade do vento.

Relativamente à rosa dos ventos, existem duas direcções dominantes, como é observável na figura 4.9.

O software permite também escolher o tipo de turbina a utilizar, fornecendo uma grande e uma pequena turbina. Optou-se pela turbina *small*. A curva de potência da turbina é apresentada na figura 4.10.



**Figura 4.10** - Curva de potência da pequena turbina eólica, facultada por *Urbawind*.

Como é possível observar através da figura 4.10, a sua potência nominal é de 6 kW. A sua velocidade de *cut-in* é de 3 m/s e a sua velocidade de *cut-out* é de 25 m/s.

Devido ao custo da licença de utilização deste programa, as simulações necessárias à extracção de dados para a realização deste caso de estudo foram efectuadas no LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

## 4.4 - Análise de dados

Os dados serão apresentados por cenário, de forma a ser mais fácil a sua percepção. Dentro de cada cenário procedeu-se à divisão em 3 fases [42]:

- A primeira fase diz respeito à caracterização do espaço envolvente, que compreende a criação de várias malhas em várias direcções e diferentes alturas de forma a posteriormente aferir as diferentes características do vento; Para cada cenário, para além das redes em malha, são introduzidos pontos de forma a obter dados específicos. Um dos pontos é estipulado como o ponto de referência e representa o papel de uma possível estação anemométrica, ou seja, o local onde são medidos os valores para avaliação do local de implementação de pequenas turbinas eólicas;

- A segunda fase caracteriza-se pela análise do local sem dados de vento específicos, ou seja, apenas suposições. Para tal, o programa disponibiliza uma entrada para definição do ângulo de hipotética proveniência do vento. De acordo com as especificidades da envolvente, é criado um cenário possível para o comportamento do vento. Resumindo, é criado um perfil de vento padrão, para várias direcções. Nesta fase são calculadas as equações RANS para todas as células da malha, e obtidos os dados relativos à velocidade média (m/s), rajada de vento verificada (m/s), Aceleração média ( $m/s^2$ ), Turbulência (m/s) e Pressão (Pa). Como o perfil do vento não é real, as células são todas transpostas para 100 metros de altura e é calculada a velocidade média de referência, fazendo a média das velocidades. A velocidade média do vento é normalizada, assim como a rajada e a turbulência, pela velocidade média

de referência. Aí são criados coeficientes, adimensionais, que permitem comparar um ponto com o de referência, obtendo assim uma fracção. Todos os dados climatológicos do *Urbawind* são, por defeito, calculados para a altura de 100 metros.

- Na terceira fase, após a introdução dos dados de vento, é efectuado um ajuste relativamente aos resultados obtidos na segunda fase. Com os dados de vento inseridos, os dados a 100 metros de altura são transpostos para os pontos locais a avaliar (através da lei logarítmica). Para esta fase, de maior importância e que melhor representa, obviamente, o cenário pretendido, são obtidos os valores de velocidade média do vento (m/s), calculada em cada ponto pela média de todas as direcções obtidas no passo anterior e de acordo com os coeficientes obtidos, de produção anual (MWh/ano), calculada através da curva de potência da turbina eólica e da frequência de aparecimento de cada velocidade do vento num ano, a turbulência, através da média de resultados em todas as direcções, e os parâmetros de Weibull, A e k.

Será posteriormente efectuada uma avaliação da relação entre os diferentes cenários.

#### 4.4.1 - Cenário 1

##### 4.4.1.1 - Caracterização do espaço

A caracterização do espaço envolve, como já foi referido, a introdução de várias malhas que posteriormente terão como função a análise aprofundada dos parâmetros. Para além dos planos são também introduzidos pontos em locais estratégicos de forma a obter os valores com maior precisão. A caracterização do espaço deste cenário e sua explicação será mais exhaustiva que os restantes, de forma a evidenciar mais claramente o funcionamento do programa.

A figura 4.11 apresenta a vista lateral do espaço, relativa ao plano transversal ao edifício.

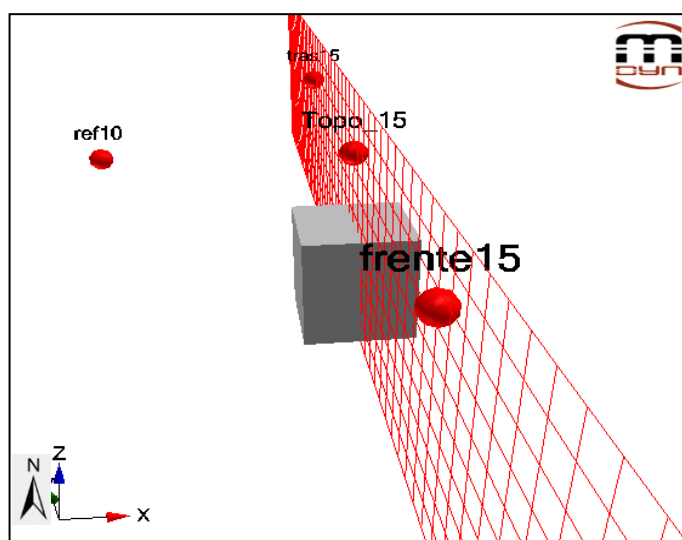


Figura 4.11 - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de *Urbawind*.



Como é observável na figura 4.11, para além do plano transversal ao edifício, estão representados quatro pontos. Três desses pontos, denominados *frente\_15*, *topo\_15* e *trás\_15*, são de análise, colocados a 15 metros de altura e à frente, no topo e atrás do edifício, como o próprio nome indica. O quarto ponto, *ref\_10* é de referência, colocado a 10 metros de altura e numa posição lateral. Uma vez que o edifício, como já havia sido referido, tem nove metros de altura, foi estipulada a altura dos pontos a seis metros acima do topo do edifício, altura esta que costuma ser respeitada na implantação das pequenas turbinas de forma a ultrapassar a zona de turbulência superior. Estes pontos estarão presentes em todos os planos apresentados de seguida.

O próximo plano introduzido é para a altura de nove metros, altura do edifício, e está representado na figura 4.12.

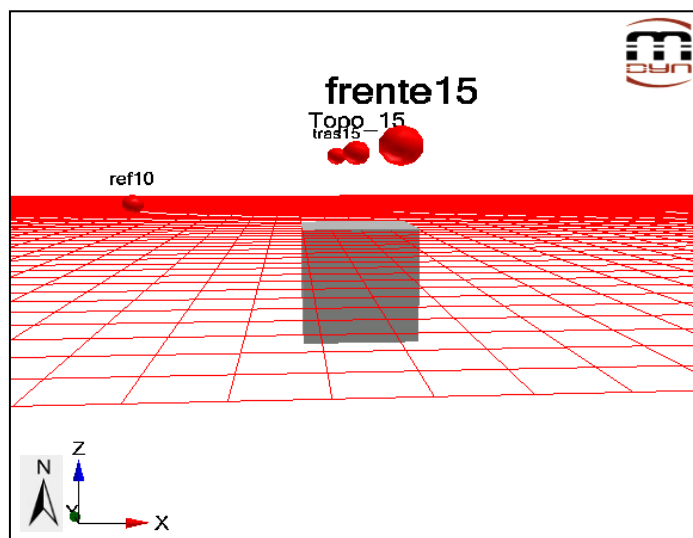


Figura 4.12 - Representação de um plano horizontal, com 9 metros de altura, obtido por *Urbawind*.

O último plano foi criado para uma altura de quinze metros, de forma a respeitar a altura convencional de implementação das pequenas turbinas. Esta representação é apresentada na figura 4.13.

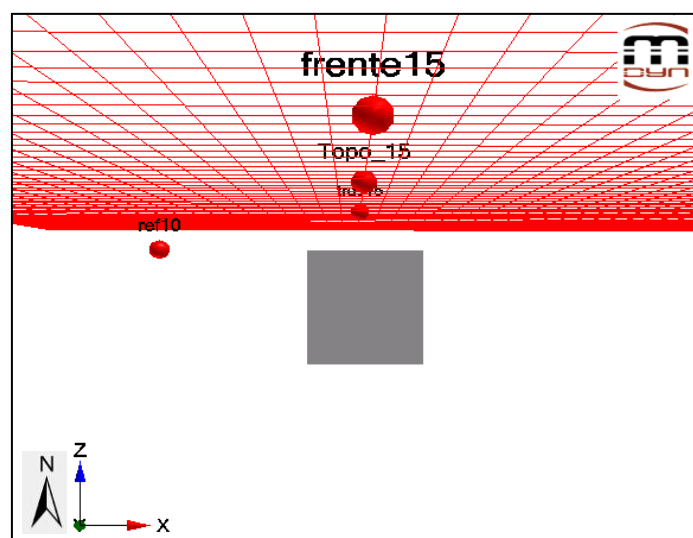


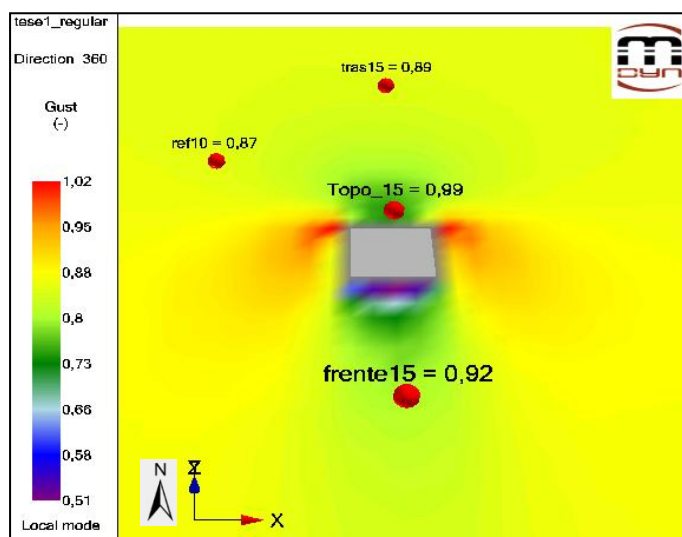
Figura 4.13 - Representação de um plano horizontal, com 15 metros de altura, obtido por *Urbawind*.

#### 4.4.1.2 - Análise sem introdução de dados de vento

É posteriormente efectuada uma análise sem introdução de dados de vento e o programa efectua uma simulação. A direcção do vento é introduzida pelo utilizador e para todos os cenários foi considerado um “passo direccional” de 30 graus que reflecte o ângulo relativamente ao centro computacional. Assim sendo, para todos os cenários obtidos, são consideradas direcções de 30 em 30 graus num intervalo de 0 a 360 graus. Serão apenas apresentadas algumas destas direcções uma vez que, como se trata de suposições, não são dados tão relevantes assim.

- Rajada de vento

Para este parâmetro são consideradas direcções de 360°, o que significa uma direcção do vento proveniente de Norte. A figura 4.14 apresenta a rajada de vento para 9 metros de altura.



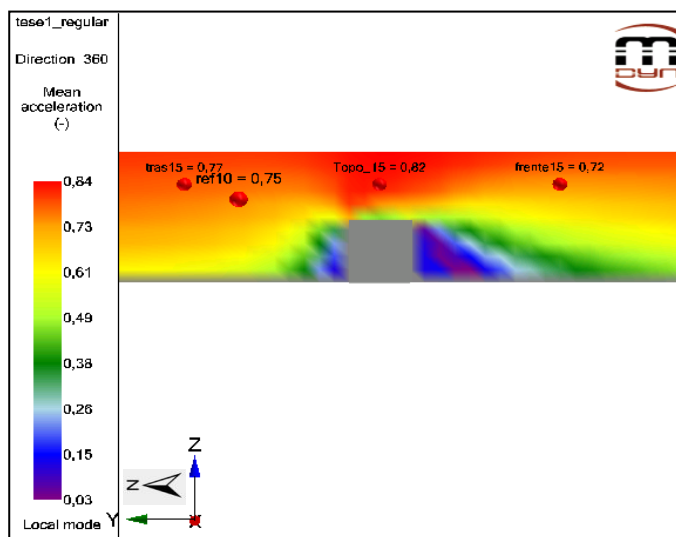
**Figura 4.14** - Representação da rajada de vento verificada num plano horizontal, com 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Na figura 4.14 é notória a rajada nas arestas da fachada de incidência do vento. Estas rajadas não são aconselháveis para as turbinas eólicas e respectiva extracção do vento. Assim sendo, é de extrema importância a determinação do lugar de implementação das pequenas turbinas, como já é conhecido. É também notório o efeito de esquina, nas esquinas frontais do edifício.

Foi também efectuada o estudo para o plano de 15 metros de altura, onde é constatada uma rajada superior, principalmente no topo do edifício. É esperado, por este facto, que o vento seja acelerado com a presença do edifício.

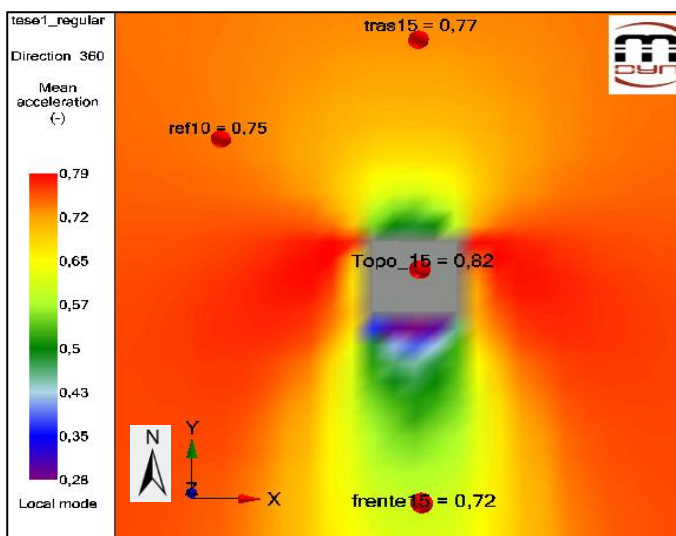
- Aceleração média

Este parâmetro é dos mais importantes a ter em conta, juntamente com a turbulência. São também consideradas, à semelhança da rajada de vento, direcções de 360°. Estas considerações são apresentadas para planos vertical e horizontais de 9 e 15 metros de altura. As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 representam, respectivamente, os planos examinados. É de realçar que o Norte no plano vertical é alterado (está na direcção da esquerda), uma vez que a vista é lateral.



**Figura 4.15** - Representação da aceleração média do vento verificada num plano vertical, obtido através de *Urbawind*.

Observando a figura 4.15 é possível aferir a diminuição de aceleração do vento na envolvente do edifício mas principalmente a esteira formada a jusante. Este resultado vem comprovar parte da teoria apresentada anteriormente.



**Figura 4.16** - Representação da aceleração média do vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

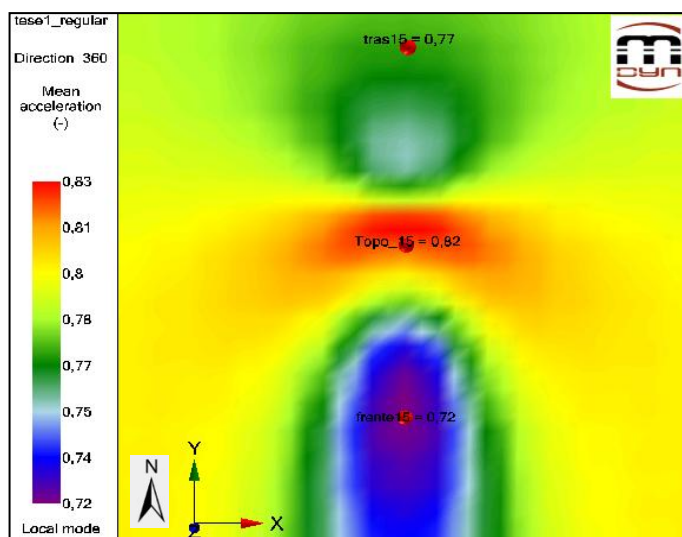


Figura 4.17 - Representação da aceleração média do vento verificada num plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Relativamente às figuras 4.16 e 4.17 é possível concluir que no plano superior, com 15 metros de altura, é detectada uma aceleração superior à do plano de 9 metros, como seria de esperar após os resultados da rajada de vento.

- Turbulência

A turbulência, como já foi referido, é o outro aspecto fundamental na análise do vento. São consideradas direcções de 360°, o que significa uma direcção do vento proveniente de Norte. À semelhança da aceleração média, são apresentadas considerações para planos vertical e horizontais de 9 e 15 metros de altura. As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 representam, respectivamente, os planos examinados.

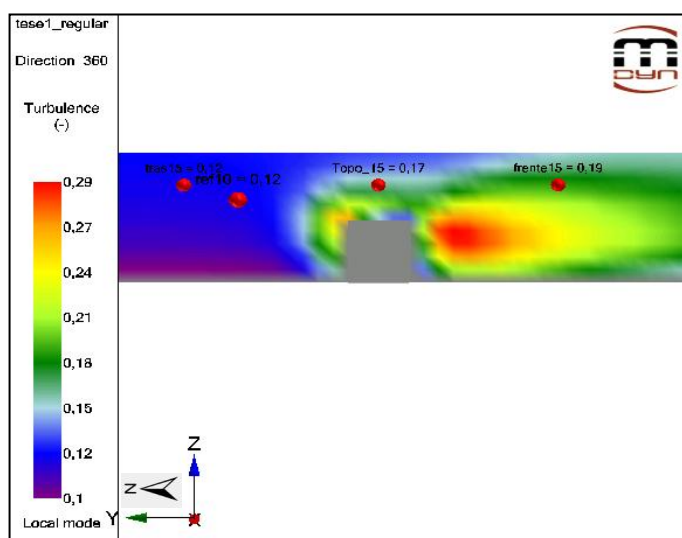
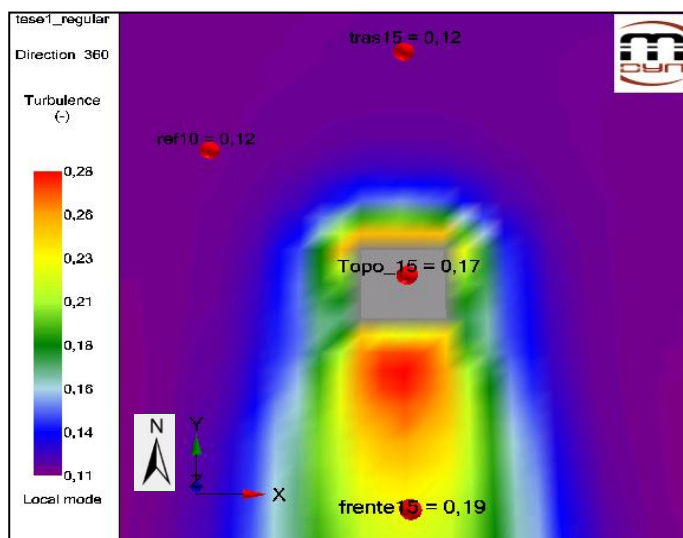
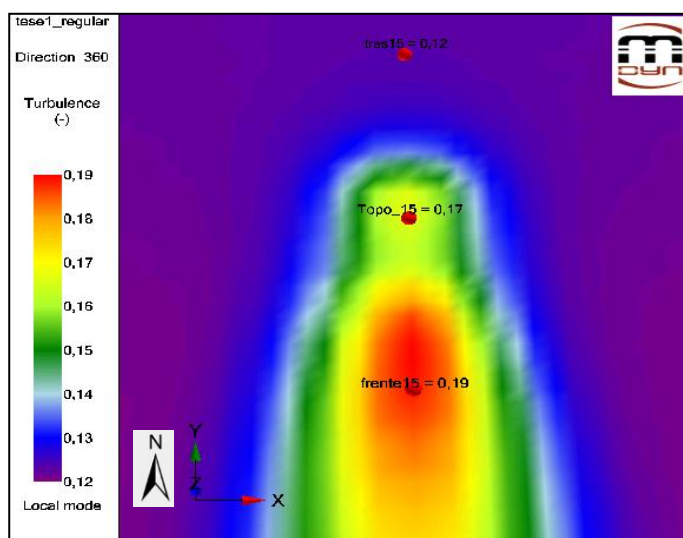


Figura 4.18 - Representação da turbulência do vento verificada num plano vertical, obtido através de *Urbawind*.

É notória, na figura 4.18, a turbulência gerada quer na envolvente quer na esteira formada a jusante. Esta esteira prolonga-se por largos metros, criando locais pouco favoráveis à implementação de pequenas turbinas eólicas. Esta esteira foi já referida em capítulos anteriores e aqui está a comprovação da questão. Também no topo do edifício é gerada alguma turbulência pelo que é necessário ter em atenção a área afectada pela turbulência e colocar o mastro da turbina eólica acima desta zona evitável. Este facto será comprovado pelas próximas figuras 4.19 e 4.20, uma vez que para uma altura superior a turbulência decresce.



**Figura 4.19** - Representação da turbulência do vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.



**Figura 4.20** - Representação da turbulência do vento verificada num plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

A diferença entre a turbulência a 9 metros e a 15 metros de altura é óbvia através da observação das figuras 4.19 e 4.20 e das respectivas escalas apresentadas na lateral. Uma vez

que a turbulência reduziu imenso quando se aumentou a altura do plano, é evidente a comprovação de que a colocação das turbinas não pode ser imediatamente acima do topo dos edifícios.

- Pressão

Relativamente à pressão, esta também já foi abordado anteriormente, no subcapítulo 3.6, referente ao ambiente urbano. A análise deste parâmetro é caracterizada pela criação de uma superfície de pressão positiva a montante do edifício e negativa a jusante e na lateral do edifício. A pressão verificada num plano horizontal a 9 metros de altura é apresentada na figura 4.21.

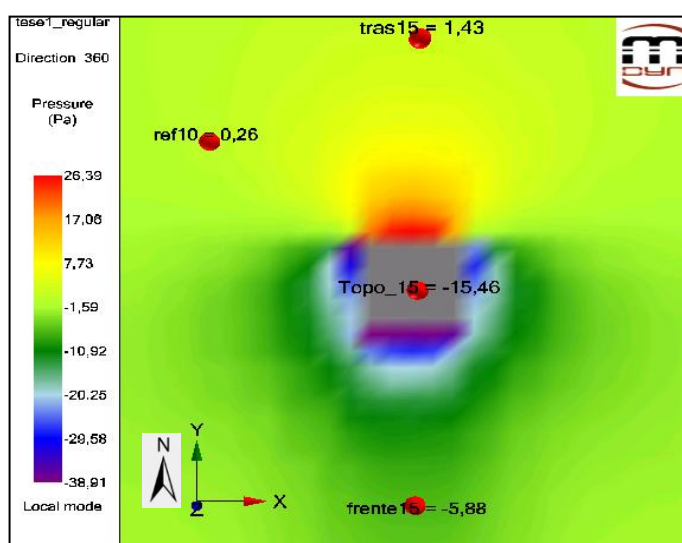


Figura 4.21 - Representação da pressão causada pelo vento verificada num plano horizontal, a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

A pressão causada pelo vento influencia a direcção deste, causando turbulência. O escoamento é então obstruído pelo edifício formando, para além de uma esteira a montante do mesmo, uma outra esteira que se estende a alguma distância para jusante. Este fenómeno já foi observado no ponto respeitante à turbulência.

#### 4.4.1.3 - Análise com introdução de dados de vento

A terceira fase das simulações envolve os dados do vento introduzidos para a zona geográfica escolhida, neste caso *Hautes-Alpes*. Esta fase já é a final, que responderá à resposta fulcral desta análise, ou seja, a quantidade de produção eólica.

Nesta fase já não subsiste o ângulo relativamente ao centro computacional uma vez que os dados são reais e já não necessitam de simulações de direcção e intensidade do vento. No entanto, através da observação dos gráficos, não é possível aferir a direcção dominante do vento. Para tal, recorre-se aos dados da estação anemométrica (denominada estação de referência) de forma a obter um histograma e uma rosa dos ventos relativos aos dados do vento mas desta vez com influência do edificado.

Estes dados são apresentados na figura 4.22.

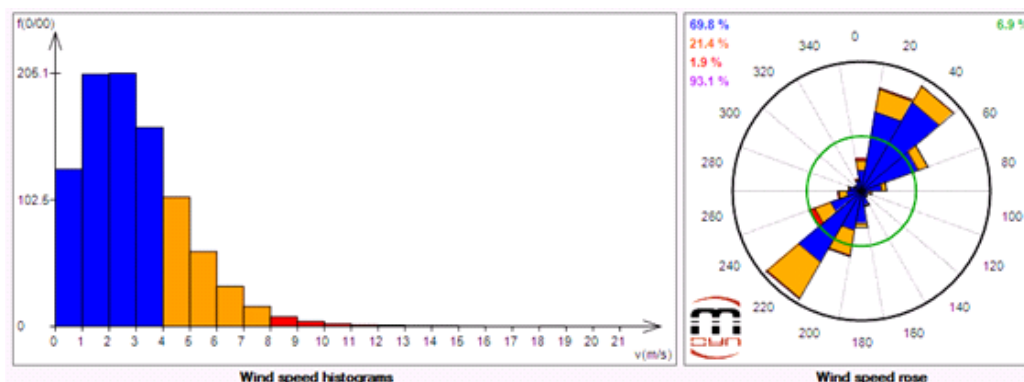


Figura 4.22 - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de *Hautes-Alpes* para o cenário 1, por Urbawind.

Será então calculada para o presente cenário, à semelhança do efectuado para a série de vento inicial, (equação 4.1) a média da velocidade da série de vento:

$$\bar{v} = \frac{1}{93,13} \times 277,875 = 2,984 \text{ m/s} \quad (4.3)$$

Comparando a média da velocidade do vento obtida para o primeiro cenário (2,984 m/s), que consiste na existência de um edifício regular, com a média da velocidade do vento para a série de vento inicial (3,989 m/s), é possível concluir facilmente que o valor médio da velocidade decresce com a presença de edificado. No entanto, e uma vez que o intuito é a colocação de turbinas em ambiente urbano, tem de se assumir isso como um dado adquirido e apenas tentar otimizar os valores da velocidade pois a energia obtida é directamente proporcional a esta.

Relativamente à rosa dos ventos, é mantida a direcção do vento relativamente aos dados iniciais, apenas com muito ligeiras alterações. A direcção dominante é 40 e 220 graus.

Serão de seguida analisadas as variáveis estudadas no *software*:

- Velocidade média

Será avaliada a velocidade média pontual para dois planos horizontais, de alturas 9 e 15 metros, e apresentada nas figuras 4.23 e 4.24, respectivamente.



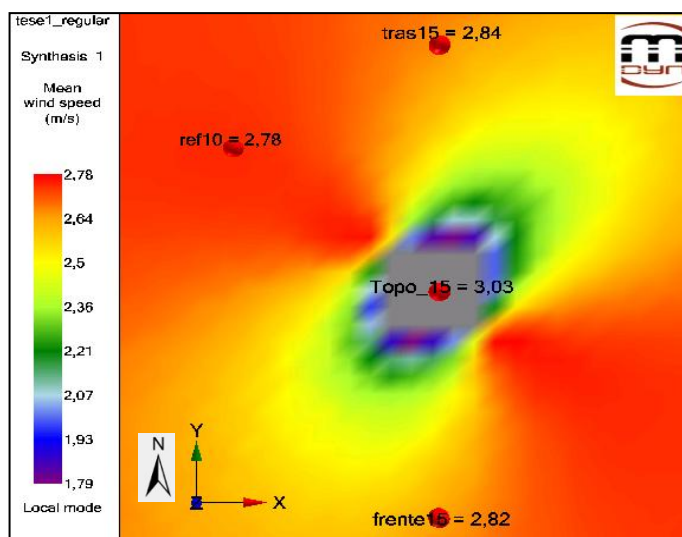


Figura 4.23 - Representação da velocidade média pontual do vento, num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

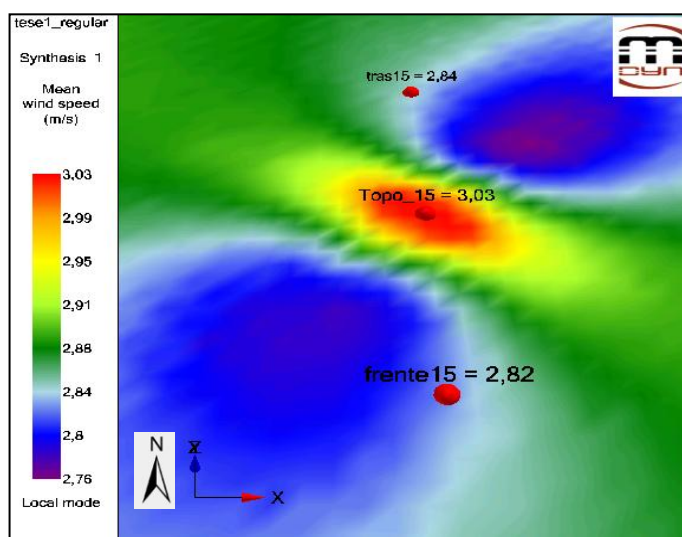


Figura 4.24 - Representação da velocidade média pontual do vento, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Como já seria de esperar, a velocidade verificada no plano superior é mais elevada que para 9 metros.

- Produção

A produção é calculada calculada com base na curva de potência da turbina eólica e na frequência de aparecimento de cada velocidade do vento num ano.

A Produção, como já foi referido anteriormente, depende da velocidade do vento. Assim sendo, prevê-se a maior Produção (em MWh/ano) nas áreas que registam maior velocidade. A figura 4.25 comprova a teoria referida.



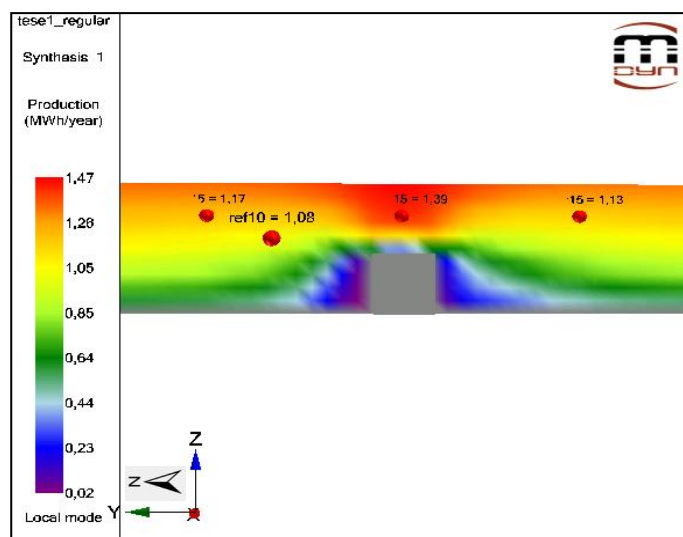


Figura 4.25 - Representação da produção, num plano vertical, obtido através de *Urbawind*.

A energia produzida costuma ser medida em horas/ano. O seu cálculo é efectuado dividindo a produção pela potência nominal da turbina utilizada (6 kW). Assim sendo, para o cenário 1 e no topo do edifício a 15 metros (onde é registado 1,39 MWh/ano), são produzidas 231,67 horas de energia/ano. Segundo dados de investigadores do LNEG, o potencial urbano poderá rondar as 1500 a 1800 horas/ano. Assim sendo, estes dados apresentam resultados energéticos muito reduzidos.

- Turbulência

O próximo aspecto a ser abordado é a turbulência, parâmetro de elevada importância na análise do potencial eólico. Embora já tenha sido analisado, desta vez é de acordo com os dados reais da série de vento e com a interferência do edifício no desempenho do vento.

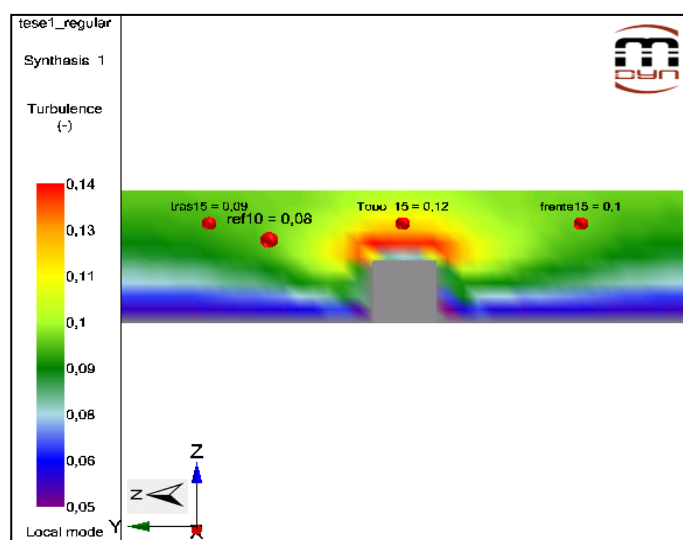
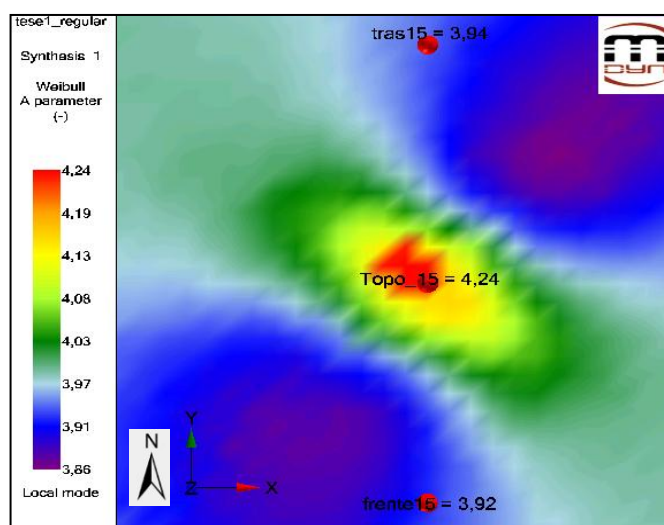


Figura 4.26 - Representação da turbulência, num plano vertical, obtido através de *Urbawind*.

A zona de turbulência acima do edifício é evidente. O objectivo é então a colocação da pequena turbina eólica acima desta nuvem turbulenta. O ponto no topo do edifício, a 15 metros de altura, já apresenta um valor de turbulência de 0,12, valor este bastante aceitável. Quanto mais baixo for o valor da turbulência, mais preciso é o valor da produção, de acordo com especificações do *software*. Para além da menor capacidade de aproveitamento da energia para valores elevados de turbulência, esta também influencia a duração de vida da turbina eólica. Esta longevidade será inferior se o local de implementação for muito turbulento.

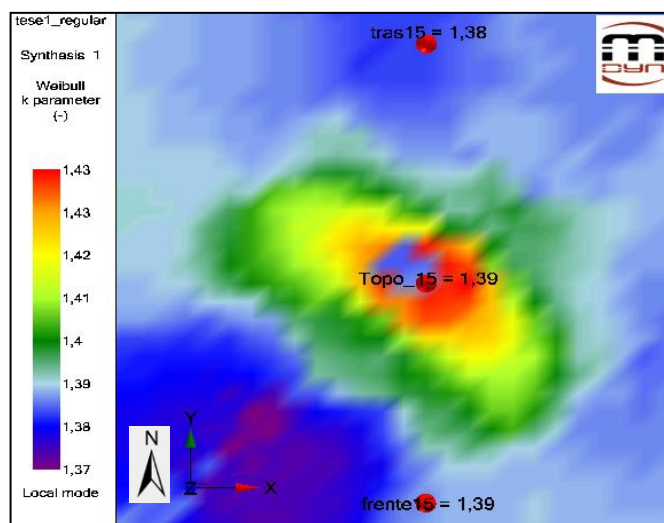
- Parâmetros de Weibull

O *software Urbawind* também fornece os parâmetros da distribuição de Weibull, A e k. A figura 4.27 apresenta a distribuição do valor do parâmetro A mapa do local de estudo.



**Figura 4.27** - Representação do parâmetro A da distribuição de Weibull, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

A figura 4.28 representa o parâmetro k da distribuição de Weibull.



**Figura 4.28** - Representação do parâmetro k da distribuição de Weibull, num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

A partir dos cálculos dos parâmetros de Weibull, o programa tem condições para proceder à junção dos dados da função distribuição de velocidade de vento e da curva de potência da pequena turbina eólica. Estes dados são apresentados apenas a título ilustrativo.

#### 4.4.2 - Cenário 2

O segundo cenário é muito semelhante ao primeiro, apenas com uma pequena irregularidade no topo do edifício. Os dados apresentados serão mais resumidos, tendo como objectivo principal a comparação com o primeiro cenário.

##### 4.4.2.1 - Caracterização do espaço

A figura 4.29 apresenta a vista do plano transversal.

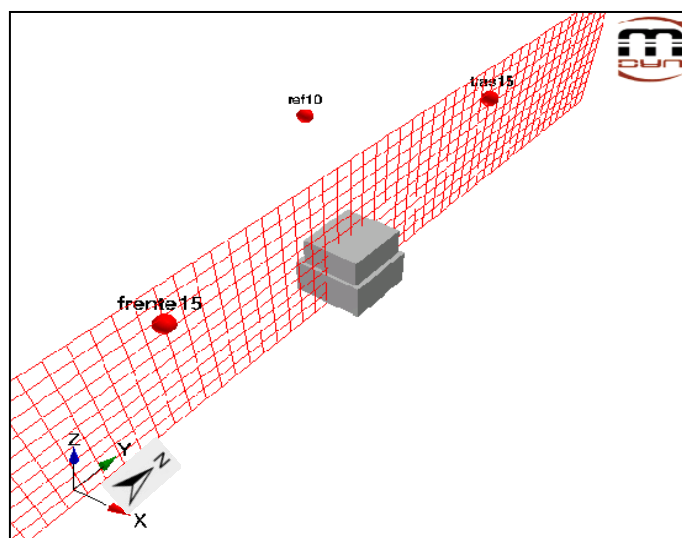


Figura 4.29 - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de *Urbawind*.

Como é observável na figura 4.29, para além do plano transversal estão representados três pontos, dois de análise, colocados a 15 metros de altura e um de referência, colocado a 10 metros de altura e numa posição lateral. Foram também introduzidos planos horizontais para a altura de nove e quinze metros, que serão apresentados com os resultados.

##### 4.4.2.2 - Análise sem introdução de dados de vento

Para a análise sem vento do segundo cenário serão apresentados apenas os resultados para o parâmetros aceleração média.

- Aceleração média

Será apresentado, na figura 4.30, o panorama da aceleração média no local em questão, para a altura de nove metros e direcção do vento de 360°.

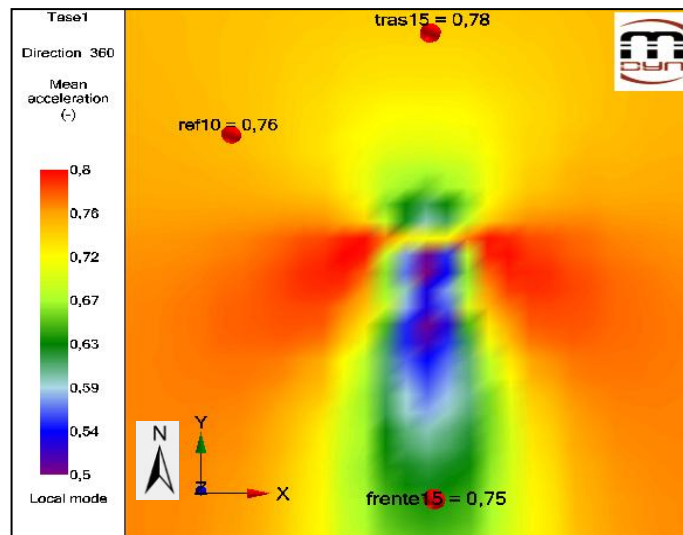


Figura 4.30 - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Os valores obtidos nos pontos a montante e a jusante do edifício para o segundo cenário são ligeiramente superiores aos valores obtidos para o edifício regular. Esta diferença deve-se ao facto de o vento acelerar apenas com a mudança estrutural do edifício e os dados de vento, embora iguais, ainda não tenham sido introduzidos. Para a altura de quinze metros é também registado um comportamento semelhante, ou seja, um ligeiro aumento da aceleração média nos pontos considerados.

#### 4.4.2.3 - Análise com introdução de dados de vento

Através dos dados da estação anemométrica (denominada estação de referência) obtém-se um histograma e uma rosa dos ventos relativos aos dados do vento. Estes dados são apresentados na figura 4.31.

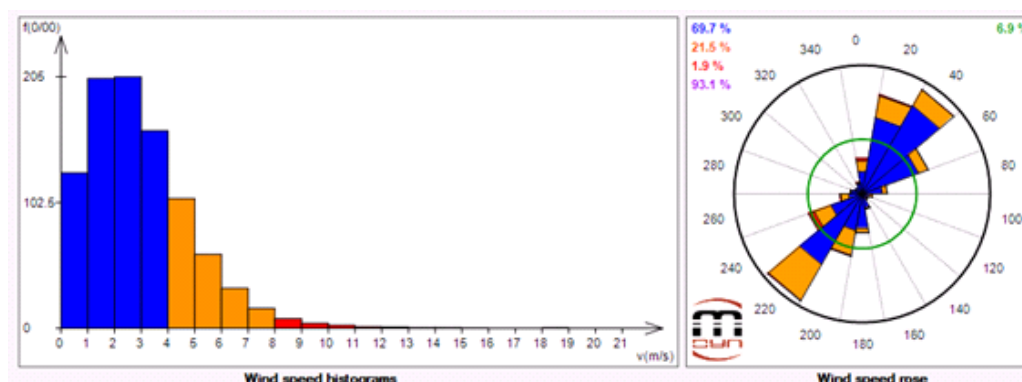


Figura 4.31 - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de *Hautes-Alpes* para o cenário 2, por *Urbawind*.

Será então calculado para o presente cenário, à semelhança do efectuado para a série de vento inicial e para o primeiro cenário, a média da velocidade da série de vento.

$$\bar{v} = \frac{1}{93,13} \times 278,785 = 2,994 \text{ m/s} \quad (4.4)$$

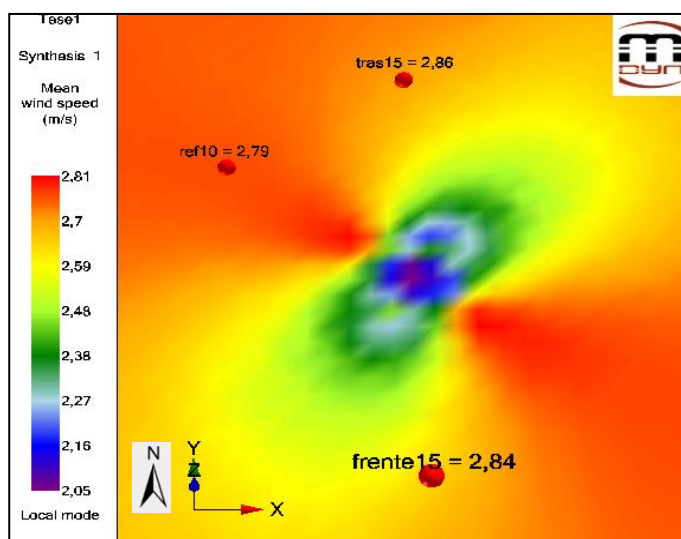
Comparando a média da velocidade do vento obtida para o primeiro cenário, que consiste na existência de um edifício regular (2,984 m/s), com a média da velocidade do vento do presente cenário (2,994 m/s), é possível constatar que se manteve praticamente igual.

Relativamente à rosa dos ventos, é mantida a direcção do vento relativamente aos dados iniciais, apenas com muito ligeiras alterações.

Serão de seguida analisadas as variáveis mais relevantes estudadas no *software*.

- Velocidade média

Os valores obtidos são para o plano horizontal de 9 metros de altura.



**Figura 4.32** - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 9 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Os resultados obtidos, embora muito idênticos aos obtidos para o primeiro cenário, apresentam um ligeiro aumento relativamente à velocidade média do vento. De acordo com a teoria, o vento abranda com o aumento da largura do obstáculo, sendo mais evidente nas proximidades deste. Uma vez que o edifício em questão tem menor largura que o do primeiro cenário, é natural que não constitua uma obstrução tão marcante no desempenho do vento. A irregularidade da sua configuração pode também induzir uma aceleração do escoamento devido à concentração de linhas de corrente.

Também a produção é então superior à obtida no primeiro cenário, quer para o ponto *frente\_15*, cujo resultado é de 1,16 MWh/ano (comparativamente à produção de 1,13 no primeiro cenário), quer para o ponto de referência *ref10*, cujo valor é de 1,09 (ligeiramente superior a 1,08).

Relativamente à turbulência é ligeiramente inferior ao primeiro cenário, pelo que se pode concluir que esta configuração é superior em comparação com a anterior, uma vez que são

obtidos melhores resultados de velocidade e portanto de produção, para uma turbulência idêntica ou até inferior.

#### 4.4.3 - Cenário 3

O terceiro cenário envolve a simulação de dois edifícios, de alturas semelhantes, e estruturas ligeiramente diferentes.

O intuito desta simulação é também a análise da influência da forma estrutural do edifício mas principalmente a interacção entre ambos.

##### 4.4.3.1 - Caracterização do espaço

A figura 4.33 apresenta a vista aérea do plano transversal aos edifícios.

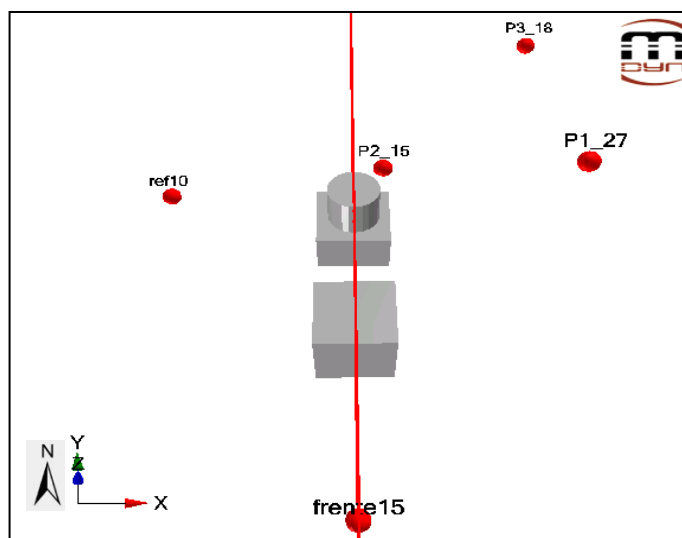


Figura 4.33 - Representação de um plano vertical transversal ao edifício, obtido através de *Urbawind*.

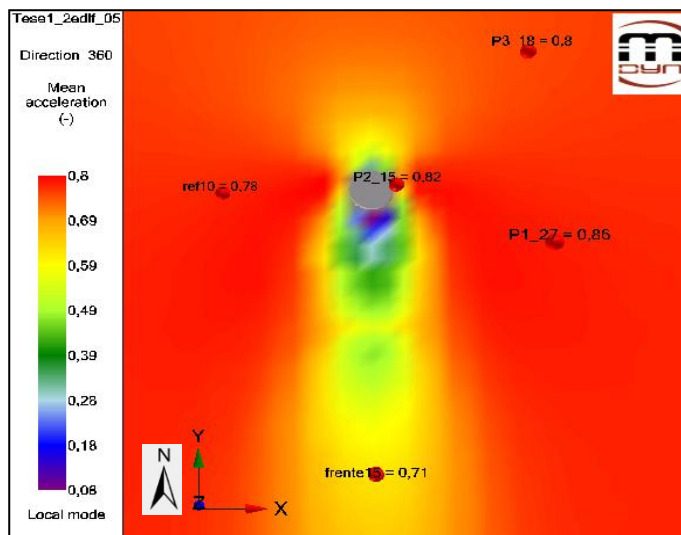
Como é observável na figura 4.33, para além do plano transversal, estão representados cinco pontos, quatro de análise e um de referência, *ref10*, colocado a 10 metros de altura e numa posição lateral. Os pontos de análise foram colocados de forma a permitir uma avaliação do desempenho do vento em vários locais, e com o intuito de obter pontos similares aos dos necessários ao quarto cenário, facilitando desta forma comparações mais exactas. Foram também introduzidos planos horizontais, para a altura de dez e quinze metros, que serão apresentados com os resultados.

##### 4.4.3.2 - Análise sem introdução de dados de vento

Para a análise sem vento do segundo cenário serão apresentados apenas os resultados mais importantes, ou seja, dos parâmetros aceleração média e turbulência.

- Aceleração média

Será apresentado, na figura 4.34, o panorama da aceleração média no local em questão, para a altura de dez metros e direcção do vento de 360°.



**Figura 4.34** - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

O valor obtido no ponto *frente\_15* é ligeiramente inferior ao obtido no primeiro cenário, devido ao efeito de esteira. Relativamente ao ponto *ref10*, este é superior ao primeiro cenário (0,75 e agora 0,78). Esta diferença pode dever-se à mudança estrutural do edifício, juntamente com o acréscimo de um edifício, que poderá induzir a uma aceleração provocada por um pequeno túnel de vento.

No entanto, os resultados obtidos ainda são relativos a previsões, uma vez que são simulados com vento padrão e não com os valores de vento pretendidos.

- Turbulência

Relativamente à turbulência, é apenas apresentado, na figura 4.35, o resultado para o plano horizontal de dez metros e direcção de 360°, à semelhança do ponto anterior.

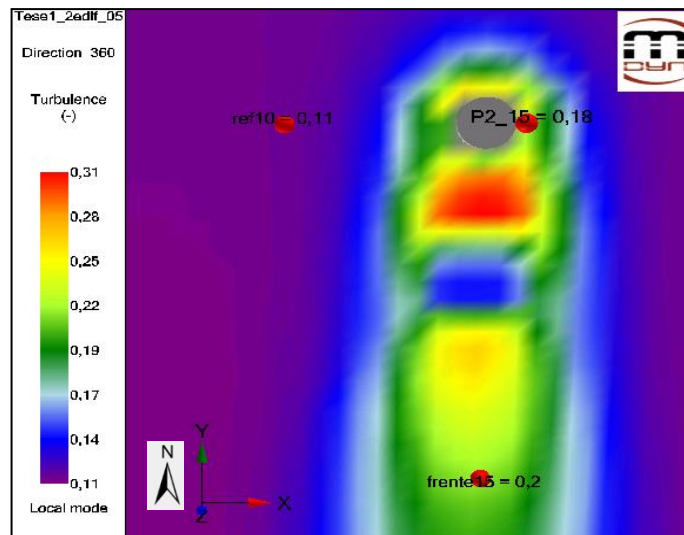


Figura 4.35 - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Comparando com os resultados obtidos para o cenário 1, a turbulência aumenta ligeiramente. O destaque nesta figura é indubitavelmente a zona turbulenta criada entre os dois edifícios (representada a vermelho). Também se evidencia uma esteira turbulenta a jusante dos dois edifícios, mas muito menos significativa.

#### 4.4.3.3 - Análise com introdução de dados de vento

Através dos dados da estação anemométrica (denominada estação de referência) obtém-se um histograma e uma rosa dos ventos relativos aos dados do vento. Estes dados são apresentados na figura 4.36.

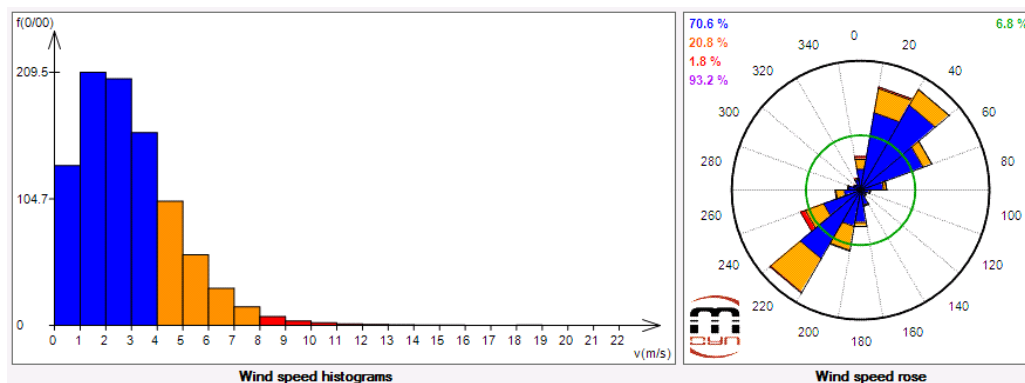


Figura 4.36 - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de *Hautes-Alpes* para o cenário 3, por *Urbawind*.

Será então calculada para o presente cenário, à semelhança do efectuado para a série de vento inicial e para o primeiro cenário, a média da velocidade da série de vento.

$$\bar{v} = \frac{1}{93,15} \times 273,525 = 2,936 \text{ m/s} \quad (4.5)$$



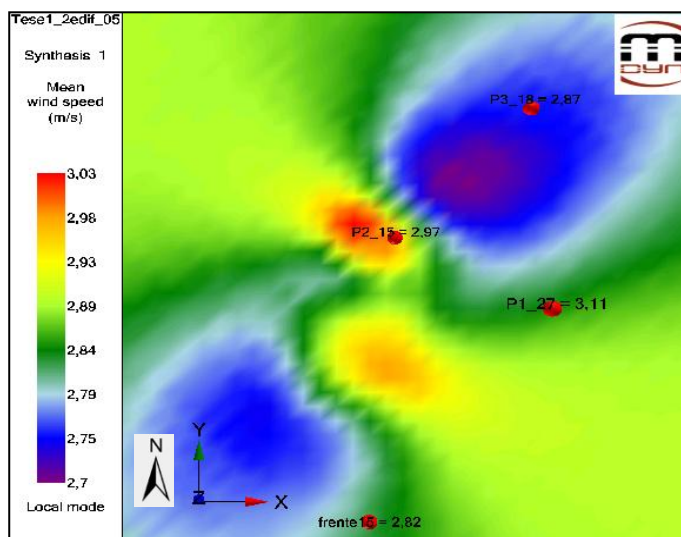
Comparando a média da velocidade do vento obtida para o primeiro cenário, que consiste na existência de um edifício regular (2,984 m/s), com a média da velocidade do vento do presente cenário (2,936 m/s), é possível constatar uma diferença, ainda que ligeira. É possível então concluir que a presença de apenas mais um edifício já é significativa para a média da velocidade do vento a 100 metros de altura.

Relativamente à rosa dos ventos, é mantida a direcção do vento relativamente aos dados iniciais, apenas com muito ligeiras alterações.

Serão de seguida analisadas as variáveis mais relevantes estudadas no *software*.

- Velocidade média

Os valores obtidos são para o plano horizontal de 15 metros de altura.



**Figura 4.37** - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Os resultados obtidos na figura 4.37 apresentam uma prevalência do edifício irregular (representado mais acima) relativamente ao regular. O facto de o edifício ser mais alto faz com que o escoamento eólico que embate no edifício seja acelerado durante a subida até ao topo do edifício. No entanto, esta velocidade superior pode estar associada a uma maior turbulência, deixando portanto de ser vantajosa.

É de realçar, no entanto, que a análise é efectuada em altura e que a margem para a torre eólica no topo do edifício irregular é inferior à do regular (4 e 6 metros, respectivamente). Por outro lado, embora o ponto de referência não esteja à vista nas figuras (uma vez que tem a altura de 10 metros e fica escondido com a vista aérea do plano de 15 metros), este possui valor mais baixo no presente cenário (2,74 m/s) do que no cenário 1 e 2 (ambos 2,78 m/s) pelo que se pode concluir que a presença de mais um edifício diminui a velocidade do vento.

- Produção

A produção traduz a variável fulcral de toda esta análise. Uma vez que a velocidade apresentada é inferior neste cenário, é natural que a produção também o seja. A figura 4.38 apresenta os resultados obtidos relativamente a este parâmetro.

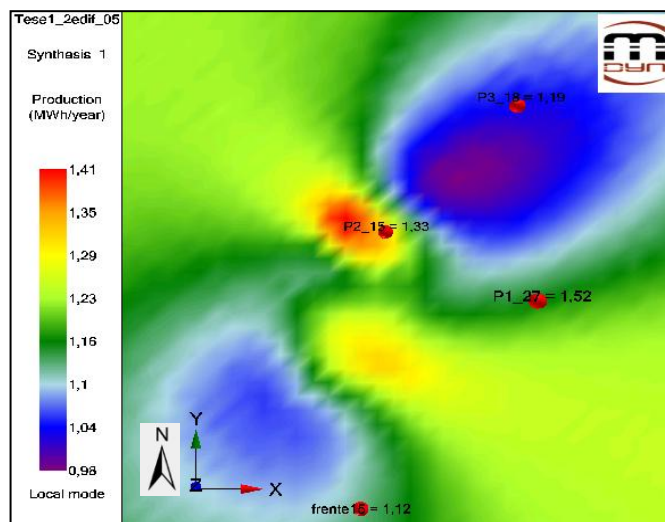


Figura 4.38 - Representação da produção do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

É possível então constatar que a produção no ponto *frente\_15* é inferior aos dois últimos cenários, como era expectável.

A conclusão inerente à avaliação do presente cenário é a influência negativa que induz um edifício no aproveitamento do escoamento eólico num edifício adjacente.

- Turbulência

Relativamente ao parâmetro turbulência, constata-se, através da figura 4.39, resultados inferiores aos previstos na fase anterior, com um perfil do vento padrão, podendo-se assim concluir que o comportamento do vento padrão é mais forte e possivelmente mais irregular.

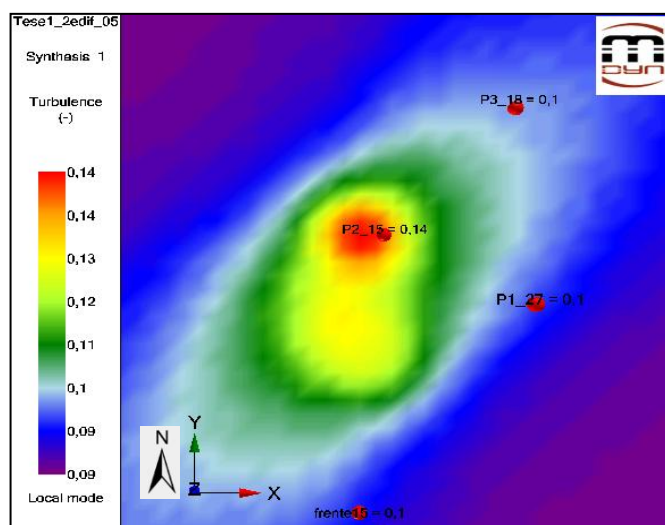


Figura 4.39 - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

A turbulência no topo do edifício irregular é mais elevada. Este facto deve-se, por um lado, à criação de acelerações do escoamento que podem provocar esta turbulência, e por outro lado à margem mais reduzida entre o topo deste edifício (11 metros e não 9 metros como o edifício regular) e o plano onde estão a ser efectuadas as medições (15 metros).

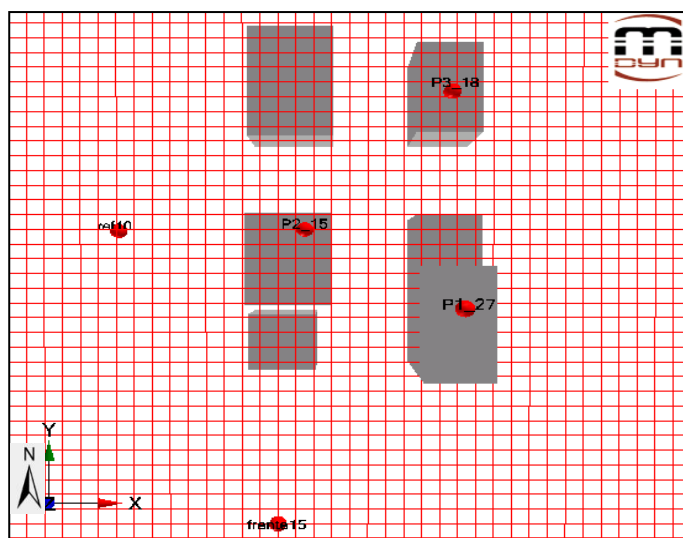
Este cenário é portanto menos favorável à implementação de uma pequena turbina eólica uma vez que a velocidade e produção são inferiores a ambos os cenários analisados anteriormente e a turbulência é muito semelhante e até superior ao segundo cenário.

#### 4.4.4 - Cenário 4

O quarto cenário é mais realista que os demais do ponto de vista urbano uma vez que representa um pequeno arruamento. Serão de seguida descritos os passos desta simulação.

##### 4.4.4.1 - Caracterização do espaço

Na figura 4.40, é representado o plano relativo aos quinze metros de altura. A vista apresentada é uma vista aérea, de modo a permitir visualizar de forma mais perceptível a colocação dos pontos de medição.



**Figura 4.40** - Representação de um plano horizontal, a 15 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Como é observável na figura 4.40, para além do plano horizontal estão representados cinco pontos, dos quais quatro de análise, nomeadamente *frente\_15*, *P1\_27*, *P2\_15* e *P3\_18*, colocados a 15, 18 e 27 metros de altura, tal como os nomes indicam, e um de referência, *ref\_10*, colocado a 10 metros de altura e numa posição lateral. As alturas escolhidas para os pontos de análise *P1\_27* e *P3\_18* estão de acordo com a margem indicada de metros acima dos respectivos edifícios (6/7 metros). Relativamente ao ponto *P2\_15* encontra-se praticamente à altura do edifício sobre o qual se encontra, de forma a denotar as diferenças

de valores obtidos imediatamente acima do edifício e com os obtidos a uma altura de 6 metros, tal como nos pontos P1 e P3.

Foram também introduzidos planos horizontais para a altura de 0,5 metros, 10 e 15 metros. A superfície de meio metro é colocada de forma a obter resultados próximos do solo e analisar assim o comportamento do vento para esta altura. A análise em questão é efectuada uma vez que este trabalho não só pretende a obtenção de um possível ponto de implementação da turbina como também uma análise global do vento em ambiente urbano, tal como a criação de esteiras e túneis de vento na base dos edifícios. Esta altura, devido ao facto de ser junto do solo, é também uma superfície de extrema importância uma vez que é a esta altura que se encontram os transeuntes. Não é aconselhável, portanto, que apresente possíveis acelerações excessivas do recurso eólico devido à criação de túneis de vento provocados pelas irregularidades dos edifícios.

Foi também introduzido um plano transversal de forma a apresentar uma vista lateral do espaço, a fim de se obter uma perspectiva diferente para uma análise mais rigorosa.

#### 4.4.3.2 - Análise sem introdução de dados de vento

Para a análise sem vento do terceiro cenário serão apresentados apenas os resultados mais importantes, ou seja, dos parâmetros aceleração média e turbulência.

- Aceleração média

A aceleração média será apresentada para um ângulo de 90° relativamente ao centro computacional e para a altura de dez metros.

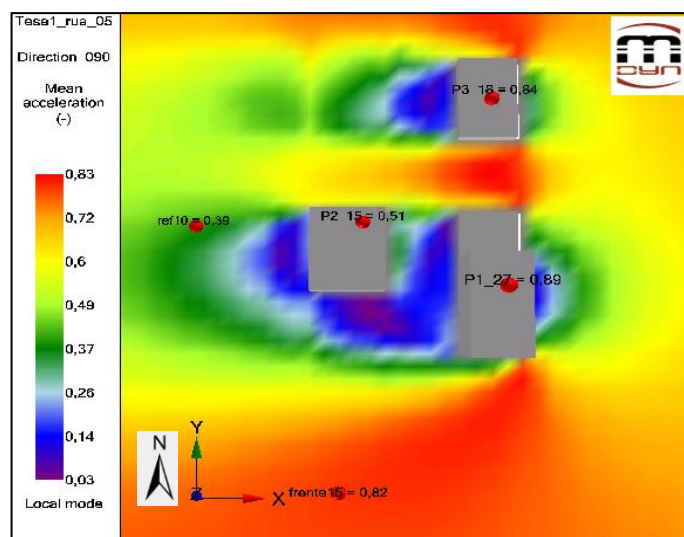
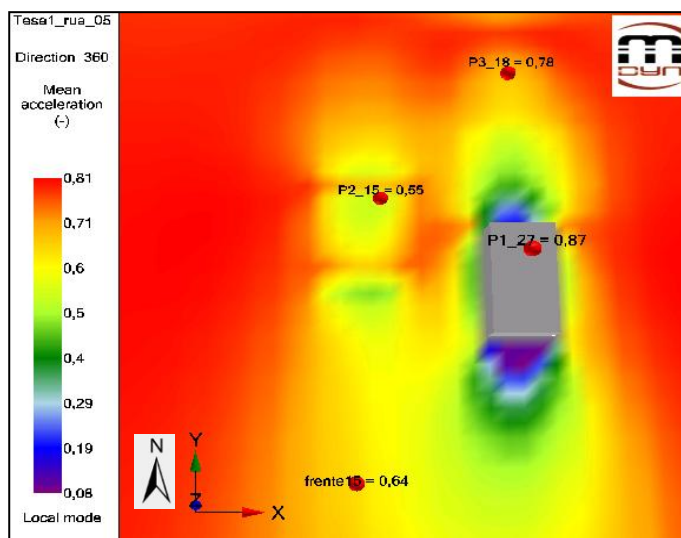


Figura 4.41 - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, com direcção de 90°, obtido através de *Urbawind*.

Relativamente ao resultado obtido no ponto de referência, que serve de ponto de comparação entre cenários, pode concluir-se que a aceleração prevista para esta configuração aumentou um pouco para o quarto cenário relativamente aos restantes.

De forma a aferir a diferença que a direcção do escoamento eólico poderá originar, serão apresentados, na figura 4.42, os resultados referentes à aceleração, mas agora com a direcção de 360 graus.



**Figura 4.42** - Representação da aceleração média do vento num plano horizontal a 15 metros de altura, com direcção de 360°, obtido através de *Urbawind*.

A comparação das figuras 4.41 4.42 evidencia a notória diferença que a direcção induz nos resultados. Relativamente ao ponto *frente\_15*, e para uma direcção do vento de 90°, o valor obtido (0,82) é bastante significativo relativamente a 0,64 para a direcção de 360°. A aceleração superior para 90° deve-se principalmente ao *Corner Effect* (ou Efeito de Esquina), mencionado no Capítulo 3. Este efeito é bem evidenciado na figura 4.41 uma vez que os cantos dos edifícios cuja fachada é frontal ao vento denotam uma aceleração significativa do escoamento eólico. Por outro lado, a aceleração inferior para a direcção de 360° deve-se ao facto de este ponto se encontrar na esteira causada pelos edifícios da malha urbana, que produzem este efeito de desaceleração do vento. Relativamente ao ponto de referência *ref10*, este é afectado pela esteira dos edifícios no caso da direcção do vento de 90°. Para a direcção de 360°, como é observável na figura 4.42, o valor é bastante superior uma vez que não existem obstáculos que impeçam ou prejudiquem o escoamento eólico.

- Turbulência

A turbulência será analisada para a altura de 0,5 metros.

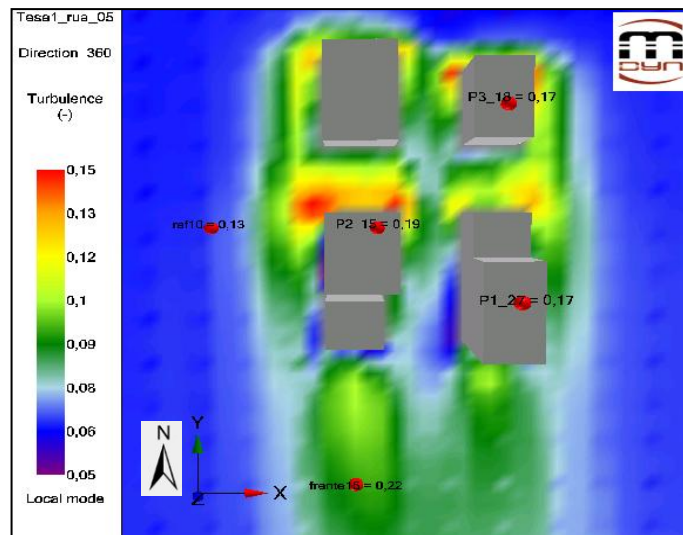


Figura 4.43 - Representação da turbulência do vento num plano horizontal a 0,5 metros de altura, obtido através de Urbawind.

Relativamente aos valores de turbulência registados nos pontos *ref\_10* e *frente\_15* pode concluir-se que são superiores aos registados nos mesmos pontos para os três primeiros cenários. Este resultado era previsível uma vez que, como analisado nos capítulos anteriores, os obstáculos provocam turbulência. Assim sendo, e uma vez que este cenário apresenta indubitavelmente mais obstáculos, provoca uma maior irregularidade na direcção do vento. Este factor condicionará o aproveitamento eólico neste cenário uma vez que não basta que um espaço tenha vento, é necessário que este recurso seja constante pois de outra forma não será bem aproveitado.

#### 4.4.4.3 - Análise com introdução de dados de vento

Através dos dados da estação anemométrica (denominada estação de referência) obtém-se um histograma e uma rosa dos ventos relativos aos dados do vento. Estes dados são apresentados na figura 4.44.

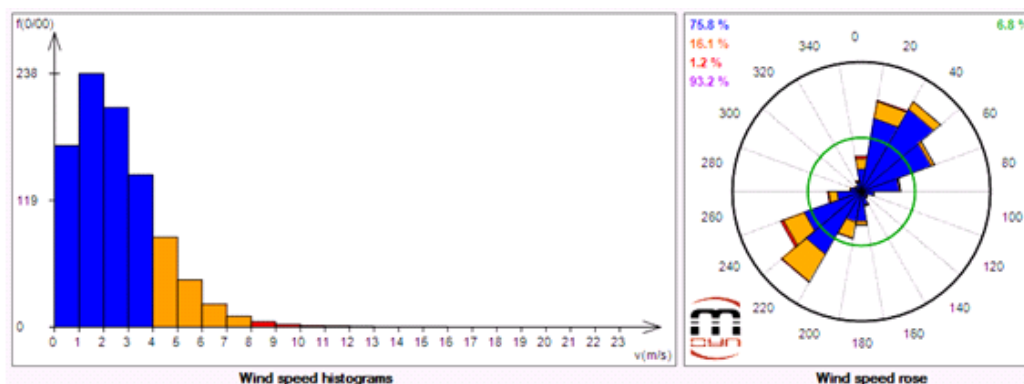


Figura 4.44 - Histograma de velocidades e rosa dos ventos de *Hautes-Alpes* para o cenário 3, por Urbawind.



Será então calculada para o presente cenário a média da velocidade da série de vento:

$$\bar{v} = \frac{1}{93,17} \times 243,075 = 2,609 \text{ m/s} \quad (3.6)$$

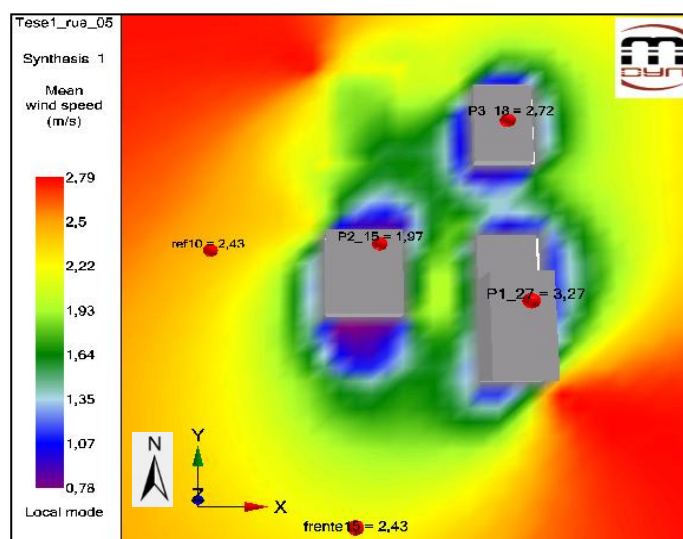
Comparando a média da velocidade do vento obtida com o valor alcançado para o primeiro cenário (2,984 m/s) e mesmo para o terceiro cenário (2,936 m/s) é possível confirmar uma diminuição da velocidade média do vento. Estas alterações eram também esperadas uma vez que, com a presença de vários edifícios, é natural que haja perdas na velocidade do vento.

Relativamente à rosa dos ventos, é mantida a direcção do vento relativamente aos dados iniciais, apenas com muito ligeiras alterações.

Serão de seguida analisadas as variáveis mais relevantes estudadas no *software*:

- Velocidade média

A figura 4.45 apresenta, para o plano de dez metros de altura, a velocidade média registada.



**Figura 4.45** - Representação da velocidade média do vento num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

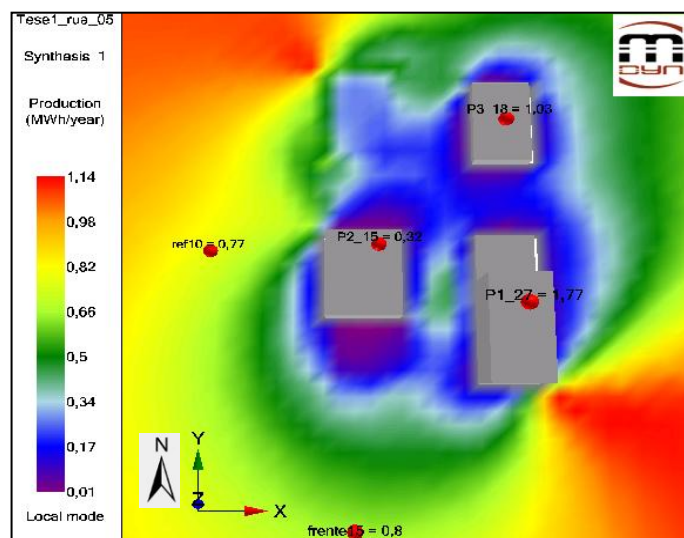
Comparando os resultados obtidos no presente cenário com os dados do primeiro cenário, constituído apenas por um edifício regular, é possível constatar que:

- O ponto de referência que representa a estação anemométrica (*ref\_10* a 10 metros de altura) apresenta um resultado inferior e de 2,43 m/s no presente cenário (comparando com 2,78 nos cenários 1 e 2 e 2,74 comparando com o cenário 3);
- O ponto *frente\_15*, presente em todos os cenários, apresenta resultado inferior no presente cenário (2,43 contra 2,82 no primeiro e terceiro cenários e 2,84 no segundo);
- O ponto *P1\_27* do presente cenário apresenta de longe o valor mais alto de velocidade média registado em qualquer um dos cenários, sendo superior ao mesmo ponto obtido no terceiro cenário.

Estes dados permitem concluir que: primeiro, e como resumo dos dois primeiros pontos, o edificado denso criado hipoteticamente no cenário 4, e representativo de uma área urbana, reduz a velocidade comparativamente aos cenários que apresentam apenas um edifício; segundo, e como conclusão do terceiro ponto apresentado, a altura a que é colocada a turbina é verdadeiramente importante, uma vez que, embora se registre no cenário 4 a velocidade média mais baixa comparativamente aos restantes cenários simulados, é neste mesmo cenário que é registada a maior velocidade pontual do vento de todas as simulações, para a altura de 27 metros. Por outro lado, verifica-se que esse mesmo ponto no cenário 3, em que o ponto se encontra isolado (no ar), a velocidade não é tão significativa (3,11 comparativamente com 3,27 no presente cenário). Esta constatação leva à conclusão de que a altura do edifício pode também conduzir a uma aceleração da velocidade do vento, podendo representar a turbulência no topo do edifício, facto que será testado no parâmetro referente à turbulência, apresentado de seguida.

- Produção

Quanto ao parâmetro relativo à produção de energia eólica, serão também apresentados os resultados para o plano horizontal de dez metros.



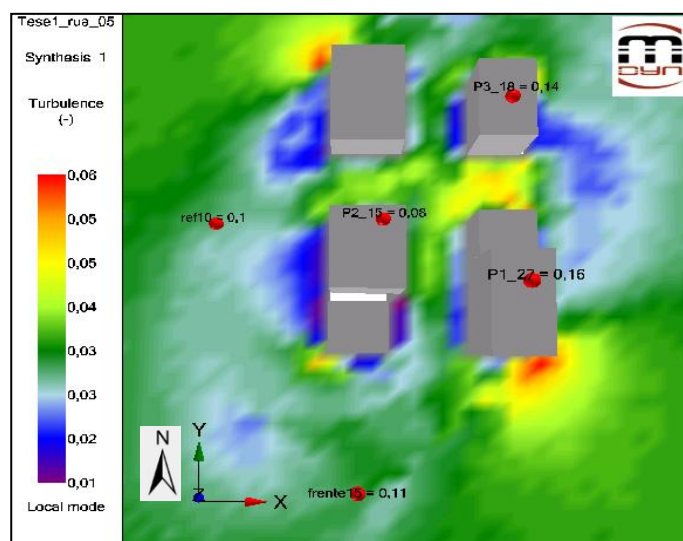
**Figura 4.46** - Representação da produção anual num plano horizontal a 10 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Efectuando da mesma forma a comparação com os restantes cenários é possível concluir que a energia obtida na zona densamente urbanizada é inferior (*ref\_10* igual a 0,77 e *frente\_15* igual a 0,8 contra 1,08 e 1,13 respeitantes aos mesmos pontos mas relativos ao primeiro cenário). Estes resultados já eram previsíveis pela análise teórica mas foram agora confirmados pelos dados referentes à velocidade média registada.



- Turbulência

Relativamente à turbulência, será apresentado o plano referente à altura de meio metro.



**Figura 4.47** - Representação da turbulência registada num plano horizontal a 0,5 metros de altura, obtido através de *Urbawind*.

Como também seria previsível, a turbulência registada neste cenário é superior à registada nos três primeiros cenários.

É interessante efectuar também o confronto entre os resultados obtidos para a análise sem e com introdução dos dados de vento locais. Comparando os resultados é possível concluir que a previsão dos valores de turbulência, ou seja, para supostos dados de vento, foi superior aos resultados de facto constatados, uma vez que o *software* previa, para o ponto de referência, 0,12 e registaram-se 0,1, e para o ponto frente\_15 previa 0,19 e se registaram apenas 0,11. As ilações a retirar desta comparação relacionam-se com a subestimação do local, uma vez que previa um pior desempenho do vento e com carácter mais irregular.

Relativamente ao ponto *P1\_27*, e comparando o resultado da turbulência obtido para o presente cenário - 0,16 - com o obtido para o terceiro cenário - 0,1 - é possível constatar que este cenário é mais turbulento, podendo a maior velocidade estar relacionada com este facto, pelo que é necessário atender a este factor.

## 4.5 - Resumo final

Os vários cenários criados permitiram comprovar a influência de alguns parâmetros no desempenho eólico, tais como a altura e a presença de obstáculos nas proximidades e a orientação do edifício relativamente à direcção dominante do vento, factores já abordados teoricamente.

Foram ainda analisados vários efeitos verificados neste ambiente em análise e, por comparação de cenários, foram comprovadas teorias anteriormente apresentadas. Estes efeitos envolvem principalmente 1) a zona de turbulência e área de vórtices criada quer a

montante quer a jusante dos edifícios, 2) o efeito de esquina, em que se constata uma maior aceleração do vento nestas zonas, 3) o efeito de túnel, em que o vento é acelerado nos interstícios dos edifícios.

A realização do primeiro e segundo cenários tinha como intuito principal a comparação e aferição da estrutura do edifício no desempenho eólico. Concluiu-se que esta influencia o vento, uma vez que foram registadas velocidades mais elevadas no cenário 2, em que parte da largura do edifício era inferior ao primeiro cenário, uma vez que o volume é inferior e confere um menor bloqueio ao escoamento do vento. Pretendia, no entanto, avaliar-se a esteira produzida pelo edifício (visto como obstáculo) no escoamento eólico, facto que foi comprovado, verificando-se uma esteira a jusante muito significativa. Mesmo em altura este distúrbio provocado é verificado no plano transversal aos edifícios.

O terceiro cenário teve como objectivos principais a avaliação do impacto que a existência de um edifício nas proximidades pode ter sobre um outro, bem como a predilecção do vento e resultados obtidos em dois edifícios distintos, um regular e um irregular. Pode concluir-se que, de facto, os resultados obtidos relativamente à velocidade e energia anual são inferiores aos dois primeiros cenários, o que comprova a influência do edificado. O edifício irregular obteve melhores resultados uma vez que, embora mais alto, é mais estreito, tal como no cenário 2. A velocidade média registada neste tipo de ambiente depende das alturas relativas dos edifícios e da respectiva orientação.

Relativamente ao quarto cenário, mais representativo de uma malha urbana, é possível constatar o efeito local dos edifícios no fluxo de vento, indicativos de uma velocidade do vento superior na envolvente e no topo dos edifícios. Estas regiões são normalmente associadas a zonas de turbulência, factor que obriga a uma configuração especial e maior robustez das pequenas turbinas eólicas.

A principal conclusão a retirar do caso prático é o facto de que, embora a existência de edifícios desestabilize o vento, provocando turbulência e esteiras consideráveis quer a montante quer a jusante dos edifícios, induz também uma aceleração do recurso no topo dos edifícios. Esta aceleração, quando controlada, pode favorecer a optimização do aproveitamento do recurso eólico, permitindo obter uma energia superior e, portanto, um maior rendimento do sistema. A prova disso é o facto de o cenário 4, que representa parte de uma malha urbana, ser o que apresenta o ponto com valor mais elevado em termos energéticos (embora mesmo este seja bastante reduzido) relativamente a todos os outros cenários. A primazia energética do cenário que pretende simular o ambiente urbano relativamente aos restantes (cenário 4) deve-se à maior altura da medição, comprovando assim que mesmo com a influência do edificado é possível obter resultados superiores. Os edifícios mais altos que a sua envolvente experimentam uma menor redução da velocidade do vento no seu topo, uma vez que são menos afectados pela malha urbana e pelas perdas que desta advêm. É, no entanto, necessário atender à altura de colocação da pequena turbina eólica, uma vez que o mastro tem de ser suficientemente alto para que a zona turbulenta criada pela presença de obstáculos seja ultrapassada.

No entanto, os resultados obtidos no estudo efectuado em ambiente urbano, ou em edificado apropriado à implementação de tecnologia de microprodução, são muito inferiores em termos energéticos relativamente ao desejável.

No perfil inicial do vento (ainda sem a presença de qualquer edificado) a velocidade registada era já bastante reduzida e ainda se tornou mais insignificante com a presença dos edifícios. É possível então concluir que os dados de vento do local não são adequados à implementação de um sistema de microgeração na área respectiva.

Generalizando para outros locais, é possível concluir que com a presença de edificado dificilmente se obtêm resultados aceitáveis para a colocação de microeólicas, excepto se o local for muito ventoso e o edifício destinado à implementação da pequena turbina eólica seja alto e se destaque perante a envolvente.

De acordo com estudos efectuados em Portugal, é possível concluir que a microgeração em ambiente fortemente edificado no país pode não obter resultados com lucros consideráveis. Assim sendo, para uma indústria que pretenda desenvolver uma pequena turbina, a sua venda não se pode apenas limitar ao mercado nacional, devendo ter também objectivos de expansão para o mercado internacional.



# Capítulo 5

## Análise Económica

### 5.1 - Fundamentos Genéricos

Um dos pontos fortes do recurso eólico é o facto de este poder reduzir a exposição da economia portuguesa à volatilidade dos preços de combustível. Por este facto, ainda que o vento seja mais caro por kWh que outra forma de energia, é facilmente justificável a quota investida nesta área. Dependendo da robustez da sua fonte, a energia eólica poderá ser, no entanto, considerada das energias renováveis mais competitivas do mundo. Comparando, por exemplo, com o gás natural, para este recurso energético os custos relacionados com o combustível e a manutenção envolvem 40 a 70 por cento dos gastos totais dispendidos.

Para uma instalação eólica genérica, os custos abrangidos incluem: investimento inicial do equipamento, custos de instalação, custos de operação e manutenção (vulgarmente denominado O&M), custos de planeamento e projecto, tempo de vida esperado de uma turbina, produção de electricidade, aluguer do espaço e perdas energéticas. Aproximadamente 75 por cento do custo total diz respeito ao investimento inicial de equipamento, que inclui, por exemplo, o custo da turbina eólica, equipamento eléctrico e a ligação à rede.

O estudo da viabilidade económica é fundamental para a decisão da instalação eólica.

A figura 5.1 apresenta os custos envolvidos numa central eólica, anteriormente explicitados.

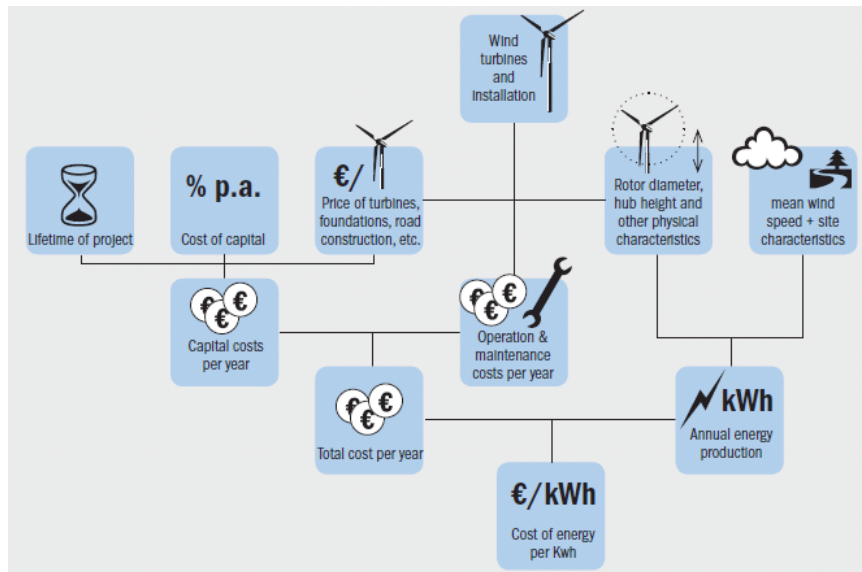


Figura 5.1 - O custo da energia eólica [44]

De forma a determinar a quantidade de combustível e dióxido de carbono evitáveis por esta forma de energia é necessário atribuir um preço ao barril de petróleo. Devido à flutuação de preço que se tem verificado ao longo dos tempos, foi atribuído o valor de 90 dólares por barril (preço aproximado do que se encontra actualmente). Relativamente ao preço do dióxido de carbono, este é fixado em 25 euros por tonelada. A figura 5.2 apresenta um gráfico que compara os investimentos anuais no recurso eólico com os custos em combustível e dióxido de carbono evitados pela utilização deste mesmo recurso.

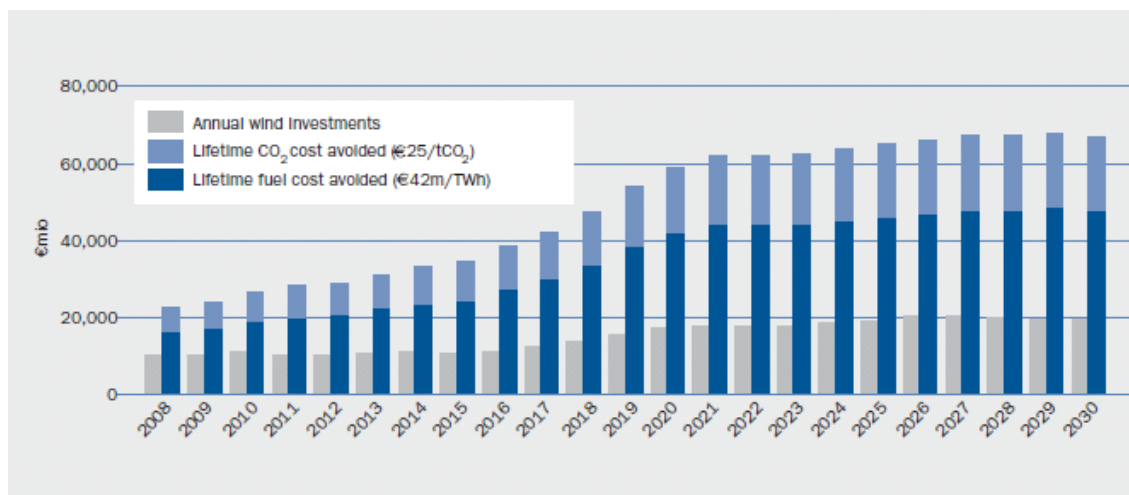


Figura 5.2 - Comparação entre investimento eólico e petróleo e CO<sub>2</sub> evitados [44]

Através da análise da figura 5.2 é possível concluir acerca da discrepância de valores entre o investimento requerido pelo recurso eólico e pelo recurso convencional, em que o renovável apresenta vantagens inquestionáveis a nível económico.

É importante referir que o investimento efectuado num determinado ano se repercute nos vinte anos seguintes, ou seja, a opção pela energia eólica evita gastos de petróleo e carbono por longa data.

## 5.2 - Microgeração eólica

As despesas envolvidas na implementação de um sistema de microgeração eólica não evidenciam tanto alguns gastos que, devido ao reduzido tamanho do sistema, não se tornam tão significativos. Assim sendo, algumas características que anteriormente foram consideradas para a grande eólica podem ser alteradas ou até desconsideradas. Os gastos referentes à microgeração eólica incluem então o investimento inicial, no qual ingressam principalmente os custos relativos ao estudo do potencial eólico do local, à instalação do gerador e aos custos de equipamentos, e os custos anuais de manutenção e operação, da qual fazem parte a operação e reposição de equipamentos como é o caso das baterias, quando existem, com vida útil prevista inferior à do restante equipamento.

Apesar disso, as turbinas eólicas de dimensão mais reduzida já não são tão compensatórias em termos económicos apresentando um preço bastante superior por kW instalado, especialmente quando pretendem produzir electricidade de qualidade para a rede.

A principal razão para esta redução de recompensa económica no caso das turbinas eólicas de pequeno porte relativamente às de grande porte deve-se ao facto de os controlos, a ligação à rede e a manutenção compreenderem uma maior proporção do custo total. Uma outra razão para a ocorrência deste facto deve-se à necessidade de aumentar a proporção da altura da torre eólica relativamente ao seu diâmetro de forma a permitir a captação de vento com menos obstáculos à passagem e portanto menos turbulento.

Assim sendo, e uma vez que na microgeração o produtor/consumidor não sente directamente a redução em termos de custo relativamente ao petróleo e ao dióxido de carbono, contrariamente ao que sucede no Estado português na geração eólica de grande escala, é necessário que as condições do local de implementação da pequena turbina sejam bastante favoráveis ao seu aproveitamento. Para a obtenção de viabilidade económica neste tipo de projecto é obrigatória a qualidade do recurso eólico. Geralmente, para que a produção de electricidade seja compensatória em termos económicos, a velocidade média anual do vento tem de ser pelo menos de 4,2 m/s [45].

É portanto importante verificar se foram efectuadas medições em áreas contíguas ou estações meteorológicas próximas. Mesmo havendo registos próximos do local onde se pretende implementar a pequena turbina, é necessário averiguar em que condições foi medido o recurso eólico uma vez que, como já foi referido no Capítulo 3, a presença de obstáculos obstrui o percurso e desempenho do vento. Por outro lado, quando as medições são efectuadas em aeroportos, constata-se normalmente uma subavaliação do recurso eólico no local de implementação da pequena turbina, uma vez que as medições são vulgarmente efectuadas em locais abrigados do vento.

Para uma avaliação mais precisa da velocidade de vento no local, é mais seguro ser avaliada por uma ferramenta própria para o efeito, que embora mais cara, garanta que não será feito um investimento em vão.

### 5.3 - O caso português para as energias renováveis

Os benefícios alcançados devido à produção distribuída e renovável, quer técnicos, ambientais ou económicos, são compensados atribuindo a estes produtores uma remuneração diferenciada por tecnologia e regime de exploração, destacando desta forma as tecnologias emergentes com elevado potencial, e proporcionando assim condições que incitam o seu desenvolvimento.

A venda de energia eléctrica à rede pública, de acordo com o regime bonificado, permite a obtenção de uma remuneração atractiva durante quinze anos, como já foi referido no Capítulo 2. A instalação de energias renováveis traz ainda benefícios fiscais, uma vez que é possível deduzir em sede de IRS até 30% do valor dos equipamentos, com um limite máximo de 777 €, para além de que a taxa de IVA dos respectivos equipamentos de microgeração é reduzida de 12%. Os rendimentos obtidos com a venda de energia estão ainda isentos de tributação até um valor máximo anual de cinco mil euros [8].

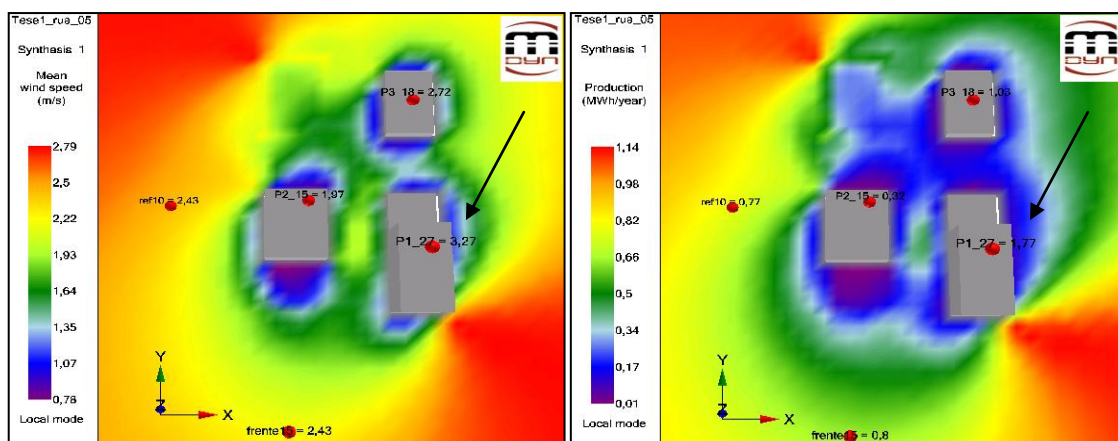
Tem-se verificado também uma maior flexibilidade de financiamento adequado, por parte do sector bancário, para investimentos em eficiência energética dirigidos ao pequeno produtor. Os empréstimos financeiros facilitados pelos bancos são vantajosos quer para o banco quer para o cliente, uma vez que o pagamento do empréstimo pode ser efectuado a partir da energia produzida. Assim sendo, e caso o local escolhido para a implementação da pequena turbina eólica seja aceitável para o seu desempenho, pode dizer-se que o custo inicial do investimento é nulo. Dependendo da prestação do equipamento, mas contando que a sua implementação só é efectuada em locais com potencial eólico, espera-se que o empréstimo fique pago ao fim de 8 anos, em média. Assumindo que o tempo de vida útil do equipamento é de 20 a 25 anos, tem-se em média 12 a 17 anos de produção de energia em que o único gasto envolve a manutenção da pequena turbina eólica.

### 5.4 - Análise Económica do Caso de Estudo

Será analisada, neste subcapítulo, a viabilidade económica do cenário 4, que corresponde à simulação de uma pequena rua. Foi escolhido, dentre todos os pontos, o que registava maior velocidade, mas de forma a que a turbulência registada fosse aceitável, de modo a garantir que o resultado da produção é minimamente fiável.

A figura 5.3 evidencia a representação da velocidade média do vento (em m/s) e produção (em MWh/ano) relativamente ao ponto *P1\_27*, como o eleito para a implementação da pequena turbina eólica. Esta implementação será então efectuada no topo do edifício e não em torre.





**Figura 5.3** - Representação do ponto escolhido para a avaliação da viabilidade económica.

Uma vez que a velocidade apresentada no ponto *P1\_27* é de apenas 3,27 m/s (inferior a 4,2 m/s), não é de esperar um investimento viável. No entanto, será efectuada essa verificação de forma a registar a veracidade da teoria apresentada.

Assim sendo, e embora este registo de velocidades tenha sido efectuada em França e não em Portugal, não faria sentido fazer a avaliação de acordo com outra legislação que não a portuguesa, assumindo desta forma que os dados de vento foram apenas ilustrativos. Resumindo, será assumido que esta implementação será efectuada em Portugal, de acordo com as normas vigentes actualmente.

Os cálculos efectuados serão de acordo com o regime bonificado, ou seja, com potência máxima de ligação à rede de 3,68 kW. Uma vez que o gerador eólico tem uma potência nominal de 6 kW, será necessário um inversor, pois a potência a injectar na rede não poderá exceder o limite referido. No âmbito da microprodução, toda a energia produzida deverá ser injectada na rede, pelo que é necessário ter alguma sensibilidade relativamente a esse assunto. À primeira vista, uma turbina com uma potência tão elevada poderá parecer um desperdício, no entanto, dificilmente se obteriam ventos constantes suficientes para esta produção contínua.

Assim sendo, e para uma produção de 1,77 MWh/ano, conforme consta na figura, serão apresentados simples cálculos económicos, apenas para ter uma noção da viabilidade económica, para esta possível situação.

A viabilidade económica da instalação eólica é avaliada considerando o período de retorno, ou seja, o período de tempo necessário a que o valor da energia produzida exceda o capital investido e os gastos dispendidos em manutenção do sistema eólico.

- Verificação do limite de Produção:

Uma vez que o limite de produção exigido no Decreto-Lei vigente relativamente à microgeração é de 4 MWh/ano por cada kWp instalado, é respeitado este máximo.

- Cálculo da Remuneração:

A remuneração estabelecida relativamente à energia eólica é calculada da seguinte forma:

$$T_E = p \times 0,65 \times 0,95^n \quad (5.1)$$

$T_E$  = Tarifa respeitante à Energia Eólica, em €/kWh

$p$  = percentagem da fonte renovável relativamente à tarifa de referência (70% para eólica)

$n$  = número de vezes que é atingido os 10MW de potência de ligação

Neste momento, se se pretender implementar uma micro-eólica, a tarifa da energia eólica é de 390,11 €/MWh, como exposto no subcapítulo 2.1. Isto deve-se ao facto de que, sempre que a potência de ligação a nível nacional atinge os 10 MW, a tarifa de remuneração é reduzida em 5%, e este processo já ocorreu três vezes ( $n=3$ ), desde que o Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro entrou em vigor.

Assim sendo, para 1,77 MWh/ano serão obtidos 690,3 €/ano. Este valor é obtido durante o ano da instalação e os 5 anos seguintes, o que induz um total de 4141,8 €.

Passados os 5 anos do ano de instalação, a tarifa aplicada depende do número de vezes que foi atingida uma potência de 10 MW, sendo actualizada anualmente. Segundo previsões efectuadas para os próximos anos, poderá fazer-se uma estimativa de remuneração ao fim dos 5 anos pós-instalação e 10 anos que os sucedem.

- Análise Final

Uma vez que não é sabido o preço da micro-eólica utilizada nas simulações do capítulo 4, os cálculos serão efectuados de forma inversa, ou seja, até quanto é que poderá custar um investimento desta natureza de forma a que este seja viável economicamente.

Para 1,77 MWh/ano, como já tinha sido referido, são obtidos 690,3 €/ano. Este valor é obtido durante o ano da instalação e os 5 anos seguintes, o que induz um total de 4141,8 €.

Passados os 5 anos do ano de instalação (excluindo o ano zero), a tarifa aplicada depende do número de vezes que foi atingida uma potência de 10 MW, sendo actualizada anualmente. Segundo previsões efectuadas para os próximos anos, poderá fazer-se uma estimativa de remuneração ao fim dos 5 anos pós-instalação e 10 anos que os sucedem. A tarifa é baseada num estudo efectuado que estima a evolução da tarifa de referência [46]. Esta tarifa tem por base o pressuposto de que a potência de ligação máxima à rede é atingida anualmente. É ainda incluído o valor máximo para desconto de IRS, de 777 €.

A tabela 5.1 apresenta detalhadamente os cálculos efectuados.

**Tabela 5.1** — Análise da viabilidade económica do caso de estudo (1,77 MWh/ano)

ano	remuneração (€/kWh)	receita (€)
ano 0 + 5 anos	0,39	4141,8
ano 6	0,29	513,3
ano 7	0,23	407,1
ano 8	0,18	318,6
ano 9	0,13	230,1
ano 10	0,1285	227,445
ano 11	0,1285	227,445
ano 12	0,1285	227,445
ano 13	0,1285	227,445
ano 14	0,1285	227,445
ano 15	0,1285	227,445
IRS (valor máximo)		777
<b>TOTAL (15 anos)</b>		<b>7752,57</b>
ano 16	0,1285	227,445
ano 17	0,1285	227,445
ano 18	0,1285	227,445
ano 19	0,1285	227,445
ano 20	0,1285	227,445
<b>TOTAL (20 anos)</b>		<b>8889,795</b>

No ano 10, como é observável na tabela 5.1, o preço de remuneração é igual ao preço de compra da electricidade actual para uma tarifa normal. A partir do momento em que este valor é atingido, e segundo a lei vigente relativa à microgeração, o valor de venda passa a ser sempre igual ao valor de compra.

É necessário ter em consideração que, de acordo com o Decreto-Lei vigente, e para usufruir do regime bonificado, é necessária a instalação de um painel solar para aquecimento de águas sanitárias. No entanto, se a implementação da pequena turbina eólica for efectuada num condomínio, a instalação do painel é dispensável, desde que seja efectuada uma auditoria energética ao edifício e sejam identificadas as medidas de eficiência energética.

Tendo em conta estes valores, é possível concluir que o investimento dificilmente será viável em termos económicos. Este tipo de equipamento tem uma duração de vida esperada de 20 a 25 anos, porém ao fim de 15 já necessita de manutenção (estes valores são variáveis consoante o equipamento, neste caso o pequeno aerogerador donQi). Ao fim de 15 anos, a micro-eólica a implementar no tipo de situação do caso de estudo ainda não estaria paga nem mesmo ao fim de 20 anos (para o caso referência da turbina eólica donQi, em que são estipulados 9000 € iniciais de referência, valor chave-na-mão).

Não foi, no entanto, considerado o valor económico associado aos benefícios ambientais, relativos às emissões de CO<sub>2</sub> evitadas, nem os benefícios técnicos por parte da rede, tais como a diminuição das perdas, a qualidade no perfil da tensão, o aumento de fiabilidade e serviços auxiliares do sistema em caso de avarias nem o provável aumento do preço da electricidade. Para além disso, com a redução do preço das tecnologias, os períodos de retorno tornam-se mais atractivos. Este aspecto contribui bastante para a difusão desta

tecnologia uma vez que o elevado preço inicial dos equipamentos pode ser ainda um entrave para o investimento. Nesse caso, e admitindo as previsões de custo da pequena eólica portuguesa que, como já referido em 2.1.2.2, rondariam os 7500 €, o investimento poderia ser efectuado mas nunca com o objectivo de lucro considerável. Se este existisse, seria mínimo.

Este resultado já era esperado uma vez que a velocidade e respectiva produção energética não atingiam os limites mínimos aconselháveis.

De forma a que este obstáculo seja ultrapassado, seria necessária a implementação de forma significativa das empresas energéticas, *ESCo*, no mercado eléctrico. Desta forma, não só promoveriam a eficiência energética como tinham maior capital disponível para investir nas tecnologias. Uma outra forma de ultrapassar os custos elevados seria o recurso a empréstimos bancários, mas para tal seria necessário que os bancos confiassem neste tipo de investimento.

Outra solução seria o aparecimento de instalações de geração à pequena escala com maior potência instalada, mini-geração, com maior impacto na rede que os actuais sistemas de microgeração.

Para além disso, poderia ser considerada a hipótese de ajuste na remuneração, consoante o desenvolvimento tecnológico e respectivo preço, uma vez que já se tornou bem menos significativa do que quando começou a vigorar, em 2008. Era esperada uma redução de preço devido a economias de escala no entanto tal não se verificou.

Este tipo de sistemas poderá apenas ser rentável em locais muito ventosos, uma vez que para a constatação de velocidades baixas e inferiores ao aconselhável, o investimento não será lucrativo em termos financeiros para o produtor/consumidor.

## Capítulo 6

### Conclusão e Trabalhos Futuros

As preocupações ambientais e os respectivos compromissos bem como o desempenho energético do país, induzem uma mudança no paradigma energético, tornando-se crucial o aproveitamento de recursos renováveis locais. Surge então a ideia de integração de tecnologias de microgeração no Sistema Eléctrico Nacional, que acarreta inúmeras vantagens para o produtor/consumidor devido à redução das facturas de electricidade, obtenção de receitas (de acordo com a lei de remuneração vigente) e maior segurança no fornecimento. Quanto ao meio ambiente e sector energético, são diminuídas as perdas associadas à distribuição, são evitados avultados investimentos em centrais e na rede e são diminuídos os gases prejudiciais. As vantagens da geração distribuída para o país são o desenvolvimento científico nessa área, a criação de postos de trabalho e a redução da dependência energética externa, devido à possibilidade de exportação de energia.

O desempenho das pequenas turbinas eólicas conjugado com o regime de vento num local determinará o rendimento anual de energia. Existem ainda diversos factores que condicionam o aproveitamento do potencial eólico, e que devem ser considerados de forma a aferir se um local é adequado à implementação de uma pequena turbina eólica, como é o caso da altura, rugosidade do solo, existência de obstáculos nas proximidades e características topográficas.

Os vários cenários criados permitiram comprovar a influência de alguns dos parâmetros referidos no desempenho do recurso eólico, tais como aspectos estruturais do edifício, altura a que são efectuadas as medições e características da envolvente tais como a presença de edifícios nas proximidades. A técnica utilizada para a modelização dos cenários foi CFD - *Computacional Fluid Dynamics*, caracterizada por capacidades de modelização fiáveis de ambientes complexos.

Os dados obtidos, através do *software* utilizado - *Urbawind*, relativamente ao perfil do vento sem a presença de edificado, demonstravam uma velocidade do vento bastante reduzida. Após a inserção de edifícios na envolvente a analisar, esta velocidade tornou-se ainda mais diminuta, facto que não seria favorável à implementação de pequenas turbinas eólicas no local, devido à reduzida energia prevista nos planos de análise.

Ainda assim, foi analisada a viabilidade económica para o ponto de maior potencial energético, de acordo com o sistema de microprodução actualmente em vigor em Portugal. Apesar das remunerações atractivas, o sistema só é lucrativo acima de uma determinada velocidade do vento. Se esta velocidade não for atingida, torna-se um mau investimento.

Pode-se então concluir que o ambiente que normalmente se constata em regime de microgeração é bastante complexo, pelo que é necessária uma análise precisa dos locais de forma a efectuar uma avaliação fidedigna, qualquer que seja o método utilizado para tal. Assim sendo, é possível aferir que, dependendo do local de implementação e do regime de vento que aí se verificar, este tipo de sistema poderá ser viável. No entanto, se a velocidade do vento constatada for baixa, não podem restar muitas esperanças na rentabilidade do sistema, uma vez que, embora a energia gerada possa responder à procura energética durante vários meses, o investimento inicial é ainda muito pesado e dificilmente será pago em tempo de vida útil.

Ao longo da execução deste trabalho foram detectadas algumas lacunas de informação, divergências de modelos e de nomenclaturas, que foram sendo referenciadas ao longo do trabalho, e que poderão ser colmatadas em desenvolvimentos futuros.

Para além disso, no *software* utilizado apenas foram importados dados sobre os obstáculos (edifícios), quando poderiam também ter sido definidos a topografia, a porosidade e rugosidade. No presente caso, a porosidade não faz sentido por se tratar de um edifício, mas caso o obstáculo fosse uma árvore, este parâmetro já podia ser adicionado. Adicionando estes factores a análise tornar-se-ia mais representativa da realidade e portanto mais fiável e completa.

## Anexo

A fórmula geral das equações tridimensionais e instantâneas de Navier-Stokes, utilizadas para a modelação matemática do comportamento do vento, são apresentadas em (1):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F \quad (1)$$

$\uparrow$  acceleration term       $\uparrow$  convection term       $\uparrow$  pressure gradient       $\uparrow$  effects of viscosity       $\uparrow$  body force

A equação de continuidade é descrita por (2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

De forma a modelizar este fluxo e a obter resultados precisos, as equações são discretizadas ao pormenor, abrangendo volumes muito reduzidos que representam apenas células de uma malha (criada para efeito de análise). Para reduzir o esforço computacional, a turbulência deve ser modelizada. O ponto de partida desta modelização é assumir que a velocidade num determinado ponto no espaço e no tempo pode ser obtida através da sobreposição de uma velocidade média que varia pouco com o tempo e uma componente aleatória que varia rapidamente. Assim, a velocidade instantânea é obtida por:

$$u = \bar{u} + u' \quad (3)$$

Após substituir a equação (3) nas equações (1) e (2), e integrando-as no tempo, é obtido o fluxo médio (4). Estas equações são então denominadas as equações RANS - *Reynolds Average Navier-Stokes*.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + F_i \quad (4)$$

$\uparrow$  Reynolds stress tensor

As tensões de Reynolds representam a transferência adicional devido às flutuações turbulentas. O principal objectivo do modelo de turbulência é prever o efeito destas tensões de Reynolds no escoamento. O próximo passo na modelação da turbulência é a formulação e

aplicação de um método adequado para que as tensões numa série de campos de fluxo sejam representadas fielmente.

O software Urbawind resolve as equações de mecânica dos fluidos, isto é, as equações de conservação de massa e momento (equações de Navier-Stokes).

Quando o fluxo é estável e o fluido incompressível, as equações transformam-se em:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + F_i = 0 \quad (6)$$

Os fluxos turbulentos são parametrizados através da viscosidade turbulenta. O método é baseado na hipótese de proporcionalidade entre estas correlações e os gradientes médios.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

A viscosidade turbulenta é considerada como o produto de uma escala de comprimento por uma escala de velocidade, ambas características das flutuações de turbulência. A escala de velocidade é dada pela raiz quadrada da energia cinética da turbulência multiplicada pela densidade (8).

$$\mu_t = \rho k^{1/2} L_T \quad (8)$$

A energia cinética da turbulência é resolvida utilizando a equação de transporte, incluindo os termos da produção e da dissipação da turbulência.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho \bar{u}_i k - \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = P_k - \varepsilon \quad (9)$$

A taxa de produção e a dissipação da energia cinética de turbulência são calculadas por:

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad (11)$$

O comprimento da turbulência varia linearmente com a distância ao obstáculo mais próximo. Convém frisar que esta modelação matemática é integralmente efectuada pelo *software*.



# Referências

1. Global Wind Energy Council. *Global Wind Report* . 2009.
2. Portal das Energias Renováveis. [Online] [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com).
3. Wagner, Hermann-Joseph and Mathur, Jyotirmay. *Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation*. Berlim : Springer, 2009.
4. European Wind Energy Association. *Wind Energy - The Facts*. [Online] <http://windfacts.eu/>.
5. U.S. Department of Energy. *Small Wind Electric Systems*. 2005.
6. European Wind Energy Association. *Wind in Power - 2009 European Statistics*. 2010.
7. British Wind Energy Association. *Small Wind Systems - UK Market Report*. 2009.
8. Ministério da Economia e da Inovação. *Decreto-Lei nº 363/2007* . 2007.
9. Direcção Geral de Energia e Geologia. *Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética*.
10. INESC Porto. [Online] [www2.inescporto.pt](http://www2.inescporto.pt).
11. Ministério da Economia, Inovação e Desenvolvimento. *Estratégia Nacional de Energia*. 2010.
12. Autonomia. [Online] [www.autonomia.pt](http://www.autonomia.pt).
13. Plurienergia. [Online] <http://www.plurienergia.pt/tecnologias-eolicas.html>.
14. DonQi. [Online] [www.donqi.eu](http://www.donqi.eu).
15. Energia Lateral. [Online] [www.energialateral.pt](http://www.energialateral.pt).
16. J.A.Revéz & Filhos. [Online] [www.revez-solar.com](http://www.revez-solar.com).
17. Next Energy. [Online] [www.nextenergy.pt](http://www.nextenergy.pt).
18. International Electrotechnical Commission. *Wind Turbine Standards*.
19. Canadian Wind Energy Association. *Small Wind Turbines*.
20. Gipe, Paul. *Wind Power - Renewable Energy for Home, Farm and Business*. Vermont : Sterling Hill Productions, 2004.
21. Lopes, João Peças. *Tipos de aerogeradores. Modelização, controlo e protecções*.
22. Estanqueiro, Ana. *Princípio de Funcionamento de uma turbina eólica: conversão mecano-eléctrica*.
23. INETI. *Como funciona uma turbina eólica*.

24. **Power Talk.** [Online] [www.power-talk.net](http://www.power-talk.net).
25. **Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L.** *Wind Energy Explained - Theory, Design and Application*. Estados Unidos da América : John Wiley and Sons, 2002.
26. **Patrocínio, Teresa.** *Ficha Técnica- Energia Eólica*. 2007.
27. **Danish Wind Industry Association.** [Online] [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
28. **Stankovic, Sinisa, Campbell, Neil and Harries, Alan.** *Urban Wind Energy*. s.l. : Earthscan, 2009.
29. **Chiras, Dan.** *The Homeowner's Guide Renewable Energy*. s.l. : New Society Publishers, 2008.
30. **Quaschnig, Volker.** *Renewable Energy and Climate Change*. United Kingdom : John Willey and Sons, 2010.
31. **Lopes, João Peças.** *O recurso eólico e a sua avaliação. Conversão de energia eólica em energia mecânica*.
32. **Wizelius, Tore.** *Developing Wind Power Projects - Theory and Practice*. s.l. : Cromwell Press, 2007.
33. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica.** [Online] <http://www.cresesb.cepel.br/>.
34. **Canhoto, Paulo.** *Energia Eólica*. Évora : s.n.
35. **Wind Energy Division.** *The World of Wind Atlases - Wind Atlases of the World*. [Online] [www.windatlas.dk](http://www.windatlas.dk).
36. **INETI.** *Potencial Eólico em Portugal Continental*.
37. **Estanqueiro, Ana.** *Energia Eólica em Ambiente Urbano construído*.
38. **Simões, Teresa.** *Base de Dados do Potencial Energético do vento em Portugal - Tese de Mestrado*. Lisboa : s.n., 2004.
39. **Simões, Teresa, Costa, Paulo and Estanqueiro, Ana.** *A first methodology for wind energy resource assessment in urbanised areas in Portugal*.
40. **Turner, Billie Lee.** *The Earth as Transformed by Human Action*. Cambridge : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1987.
41. **Google.** *Google Sketchup*. [Online] <http://sketchup.google.com/intl/pt-BR/product/gsu.html>.
42. **Meteodyn - Meteorology & Dynamics.** *Urbawind*. [Online] <http://www.meteodyn.com/en/software/urbawind.html>.
43. **Dupont, G., Clarenc, T. and Leyronnas, P.** *Urbawind - Use of a CFD model for modeling the wind in urban area*. 2009.
44. **European Wind Energy Association.** *The Economics of Wind Energy*. 2009.
45. **Ministry of Agriculture and Food.** *Electricity Generation Using Small Wind Turbines at Your Home or Farm*. Ontario : s.n., 2003.

46. Ministério da Economia e Inovação. *Renováveis na Hora - Guia para a certificação de uma unidade de microprodução*. 2010.

47. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. *Apontamentos de Produção Dispersa - Remuneração da produção dispersa*. Porto : s.n., 2009.